



**DENISE ALEXANDRA OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DE UM COLETOR
LEAL MACHADO SOLAR PLANO EM PORTUGAL**



DENISE ALEXANDRA LEAL MACHADO **OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DE UM COLETOR
SOLAR PLANO EM PORTUGAL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor António Gil D'orey de Andrade Campos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio
Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
(Orientador)

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
(Arguente)

Agradecimentos

Aos meus pais e à minha irmã, a quem tudo devo e sem eles nada seria possível. Ao meu namorado que, mesmo longe, me fez acreditar que tudo é possível.

Gostaria também de agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor António Samagaio, pelo apoio e orientação na elaboração deste projeto.

Por último, mas não menos importante, a todos os meus amigos, por toda a amizade, amor e paciência, especialmente nos momentos mais difíceis.

Palavras-chave

Otimização, painel solar, radiação solar, rendimento geométrico.

Resumo

A otimização de um coletor solar, independentemente da sua finalidade, requer que seja efetuado um estudo da disponibilidade da radiação solar ao longo do período considerado. De modo a maximizar a energia incidente, os coletores são geralmente orientados para o equador, com um ângulo ideal, que vai depender principalmente da latitude e condições climáticas do local. O objetivo do presente trabalho é a otimização da posição de um coletor solar plano em Portugal. Para tal, foram comparados os painéis fixos e ajustáveis duas e quatro vezes ao ano, com a melhor hipótese possível, o painel móvel que rastreia continuamente o sol. A dissertação apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre a energia solar e as tecnologias existentes para a conversão dessa mesma energia e, por fim os resultados e respetivas conclusões. Os cálculos foram efetuados para as cidades de Aveiro, Ponta Delgada e Funchal permitindo, assim, considerar diferentes latitudes. Os resultados obtidos demonstram que o ajuste do painel duas vezes ao ano permite um aumento do rendimento em cerca de 4,5 % quando comparado com o painel fixo. Globalmente o Funchal apresenta os melhores resultados, concluindo-se que quanto menor a latitude, melhores serão os resultados obtidos.

Keywords

Optimization, solar panel, solar radiation, geometric efficiency.

Abstract

The optimization of a solar collector, regardless of their purpose, requires the study of the solar radiation available during the time period considered. In order to maximize the incident energy, collectors are generally targeted at the equator, with the ideal angle depending mainly on latitude and climate conditions of the site. The purpose of this study/paper is to optimize the position of a flat solar collector in Portugal. To achieve the purpose of this work, it was compared the fixed panel and adjustable efficiency two and four times a year with the mobile panel, which tracks the sun continuously. The dissertation gives a brief bibliographic review on solar energy and existing technologies for the conversion of that energy, and finally the results and respective conclusions. The calculations were made for the cities of Aveiro, Ponta Delgada and Funchal, thereby allowing considering different latitudes. Results show that the adjustment of the panel twice a year allows about 4,5 % increase in efficiency, when compared to the fixed panel. Overall Funchal presents the best results, concluding that the lower the latitude, the better the results.

ÍNDICE

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Nomenclatura.....	vi
Capítulo I: Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivação	1
1.3 Radiação solar em Portugal e na Europa	2
Capítulo II: Energia Solar.....	5
2.1 Radiação Solar	5
2.2 Movimento da Terra	6
2.3 Unidades de Medida de Tempo	8
2.4 Massa de Ar	10
2.5 Ângulos Solares.....	11
2.5.1 Declinação Solar.....	11
2.5.2 Ângulos Horários Solares	13
2.5.3 Posição do Sol	14
Capítulo III: A Energia que chega ao Coletor	17
3.1 Radiação em Superfícies Inclinadas	17
3.2 Radiação fora da Atmosfera numa Superfície Horizontal.....	19
3.3 Radiação em Superfícies Móveis	20
Capítulo IV: Orientação do Coletor Solar	23
4.1 Painel Solar Fixo	24
4.2 Painel Solar Móvel	27
Capítulo V: Resultados.....	29
5.1 Resultados para Aveiro.....	32
5.2 Resultados para Ponta Delgada	36
5.3 Resultados para o Funchal	41
5.4 Análise dos Resultados.....	44
5.5 Comparação com outros Estudos Efetuados	53
Capítulo VI: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	55
Bibliografia.....	57

ANEXOS.....	61
-------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da radiação medida em Lisboa, numa placa horizontal [3]	3
Figura 2 - Mapa de irradiação horizontal solar global na Europa (kWh m^{-2}) [4].....	4
Figura 3 - Movimento da Terra à volta do Sol [10].....	6
Figura 4 - Latitude e longitude [11]	7
Figura 5 - Equação do tempo ao longo do ano [5]	9
Figura 6 - Ângulos solares [17]	11
Figura 7 - Declinação solar no hemisfério norte [20].....	12
Figura 8 - Posição do Sol ao longo do ano [23]	14
Figura 9 - Representação da altura solar no hemisfério norte [20]	15
Figura 10 - Posição do sol em relação a um plano inclinado [5].....	19
Figura 11 - Eixos de rotação do painel móvel [30]	21
Figura 12 - Piranómetro [35]	23
Figura 13 - Radiação solar incidente num plano horizontal e inclinado respetivamente [5]	26
Figura 14 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, em Aveiro.....	33
Figura 15 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Aveiro	34
Figura 16 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, em Aveiro	35
Figura 17 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Aveiro.....	36
Figura 18 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada	37
Figura 19 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada.....	38
Figura 20 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada	39
Figura 21 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada	40

Figura 22 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, no Funchal.....	41
Figura 23 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, no Funchal.....	42
Figura 24 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, no Funchal.....	43
Figura 25 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, no Funchal.....	44
Figura 26 - Média mensal do painel fixo, para a inclinação de $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} - 10$	46
Figura 27 - Média mensal do painel fixo, para a inclinação de $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ}$	47
Figura 28 - Média mensal do painel ajustável 2×/ano, para o modelo 1.....	48
Figura 29 - Média mensal do painel ajustável 2×/ano, para o modelo 2.....	49
Figura 30 - Média mensal do painel ajustável 4×/ano, nas três cidades.....	50
Figura 31 - Rendimento, η (em %), do painel ajustável 4×/ano nas três cidades.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dia médio do mês e valores de n por mês ^a [5]	12
Tabela 2 - Estimativa das melhores datas considerando ajuste 2×/ano [37].....	25
Tabela 3 - Estimativa das melhores datas considerando o ajuste 4×/ano [37].....	26
Tabela 4 - Latitude e longitude das cidades consideradas [2]	29
Tabela 5 - Inclinações utilizadas para o painel fixo	30
Tabela 6 - Inclinações utilizadas para o painel ajustável 2×/ano.....	30
Tabela 7 - Inclinações utilizadas para o painel ajustável 4×/ano.....	30
Tabela 8 - Inclinação conferida ao painel fixo, nas três cidades	44
Tabela 9 - Média anual, (em MJ m ⁻²) para o painel fixo, nas três cidades.....	45
Tabela 10 - Inclinação conferida ao painel ajustável 2×/ano, nas três cidades.....	45
Tabela 11 - Inclinação conferida ao painel ajustável 4×/ano, nas três cidades.....	46
Tabela 12 - Rendimento, η (em %), dos ajustes efetuados	52
Tabela 13 - Média anual, (em MJ m ⁻²) para o painel ajustável 2 e 4 vezes/ano, nas três cidades.....	52
Tabela 14 - Rendimento η , (em %), para a latitude de 40° [37].....	53

NOMENCLATURA

Símbolo	Designação	Unidades
ϕ	Latitude do local	°
δ	Declinação solar	°
β	Inclinação do apinel em relação à horizontal	°
γ	Ângulo de azimute da superfície	°
ω	Ângulo horário	°
ω_s	Ângulo horário do pôr-do-sol para superfícies horizontais	°
ω'_s	Ângulo horário do pôr-do-sol para superfícies inclinadas	°
θ	Ângulo de incidência	°
θ_z	Ângulo de zénite	°
α_s	Altura Solar	°
γ_s	Ângulo de azimute solar	°
G_{sc}	Constante solar	W m ⁻²
G_{on}	Radiação solar incidente num plano normal fora da atmosfera	W m ⁻²
G_o	Radiação solar incidente num plano horizontal fora da atmosfera	W m ⁻²
G_T	Radiação solar incidente num painel plano fixo	W m ⁻²
G_n	Radiação solar incidente num painel móvel	W m ⁻²
TSV	Tempo solar verdadeiro	h
TSM	Tempo solar médio	h
L_{st}	Longitude padrão do meridiano para o fuso horário local	°
L_{loc}	Longitude local	°
E	Equação do tempo	min
AM	Massa de Ar	-
N	Dia juliano	-
N	Número de horas de luz do dia	-
H	Média mensal da radiação diária incidente num plano horizontal	MJ m ⁻²
H_o	Média diária da radiação incidente num plano horizontal	MJ m ⁻²
I_o	Média horária da radiação incidente num plano horizontal	MJ m ⁻²
I_T	Média diária da radiação incidente numa superfície inclinada	MJ m ⁻²
$I_{T,b}$	Radiação solar direta incidente numa superfície inclinada	MJ m ⁻²
$I_{T,d,iso}$	Radiação solar difusa isotrópica incidente numa superfície inclinada	MJ m ⁻²
$I_{T,d,cs}$	Radiação solar difusa circumsolar incidente numa superfície inclinada	MJ m ⁻²

$I_{T,d,hz}$	Radiação solar difusa horizontal incidente numa superfície inclinada	MJ m ⁻²
$I_{T,refl}$	Radiação solar refletida numa superfície inclinada	MJ m ⁻²
R_b	Razão entre a radiação direta numa superfície inclinada para uma superfície horizontal	-
R	Razão entre a radiação total numa superfície inclinada para uma superfície horizontal	-
η	Rendimento diário da radiação incidente no coletor inclinado	-

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

A concretização deste trabalho teve como principal objetivo a otimização da posição de um coletor solar plano em Portugal, especificamente em Aveiro, Ponta Delgada e Funchal, através da adaptação de modelos matemáticos já existentes na literatura. Tomando como referência um coletor capaz de seguir os raios solares desde o nascer (do sol) até ao pôr-do-sol (*tracking system*), pretendeu-se estudar a posição fixa ao longo do ano, ou ajustável sazonalmente, que maximiza a eficiência dos coletores solares. Foi efetuada uma revisão bibliográfica sobre a radiação solar e todos os seus componentes e, por fim, a realização de estudos paramétricos, a fim de identificar a posição mais favorável à implementação dos painéis solares. Posteriormente, foram comparados os resultados obtidos neste estudo, com resultados obtidos em situações idênticas em outros estudos.

1.2 MOTIVAÇÃO

O paradigma na matriz energética mundial está a sofrer alterações visíveis, verificando-se um acentuado crescimento no mercado das energias renováveis. No entanto, embora sejam inúmeros os estudos sobre a implementação de energias alternativas, nomeadamente a energia solar, a sua aplicação efetiva é limitada.

A energia solar, de entre as fontes de energia renovável provenientes direta ou indiretamente do Sol, apresenta-se como uma das mais promissoras. Torna-se então fundamental responder à questão: ‘Como será possível otimizar a posição de um coletor solar de modo a que se obtenham eficiências superiores?’. O primeiro passo, para que tal aconteça, é otimizar a posição de um coletor em relação aos raios solares. Assim, é fundamental que se possuam dados fiáveis da radiação solar incidente numa determinada localização, de modo a que sejam estudadas as diversas aplicações que daí advêm, tais como a tecnologia fotovoltaica PV (do inglês *Photovoltaic*), sistemas solares térmicos e projetos solares passivos.

Através do recurso a parâmetros climáticos, como a insolação, presença de nuvens, temperatura, vento, entre outros, diversos modelos têm sido desenvolvidos com o propósito de estimar a radiação solar global em superfícies horizontais. A radiação global é

constituída por dois componentes: a radiação direta e difusa, e é utilizada maioritariamente na avaliação do potencial energético disponível num determinado local. A radiação direta, como o próprio nome indica, corresponde à fração que atinge a terra sem que exista qualquer mudança de direção. Por sua vez, a radiação difusa é aquela que é recebida através do sol depois da sua direção ter sido alterada pelas moléculas e partículas disponíveis na atmosfera [1].

Quando se pretende otimizar a posição de um coletor solar, é necessária especial atenção à posição da Terra em relação ao Sol, uma vez que esta varia constantemente, e a magnitude da radiação recebida depende de diversos fatores, nomeadamente do dia e estação do ano, latitude e inclinação do painel em relação à superfície.

No hemisfério norte, os painéis devem ser orientados para Sul e, a sua inclinação, deverá ser determinada de modo a minimizar o ângulo de incidência dos raios solares, permitindo assim o aumento da energia incidente. A melhor forma é através da utilização de painéis solares móveis, dotados de mecanismos que permitem rastrear o Sol continuamente ao longo do dia.

1.3 RADIAÇÃO SOLAR EM PORTUGAL E NA EUROPA

Em Portugal, a medição da radiação solar é da responsabilidade do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), onde vinte e cinco das cem estações são consideradas principais. Na rede nacional é utilizado um dispositivo recente, o radiómetro, que regista a composição espectral e a energia recebida numa superfície plana e, na rede urbana, são utilizados piranómetros com princípio de funcionamento semelhante ao utilizado na rede nacional [2].

Portugal, pela sua localização geográfica, é considerado um dos países da Europa com maior disponibilidade em termos de radiação solar. Esta afirmação é comprovada quando se compara o número médio anual de horas de Sol, que se situa entre as 2200 e 3000 horas no Continente e as 1700 a 2200 horas nos Açores e Madeira, com países como a Alemanha, que apresenta valores anuais entre as 1200 e 1700 horas de exposição solar [3].

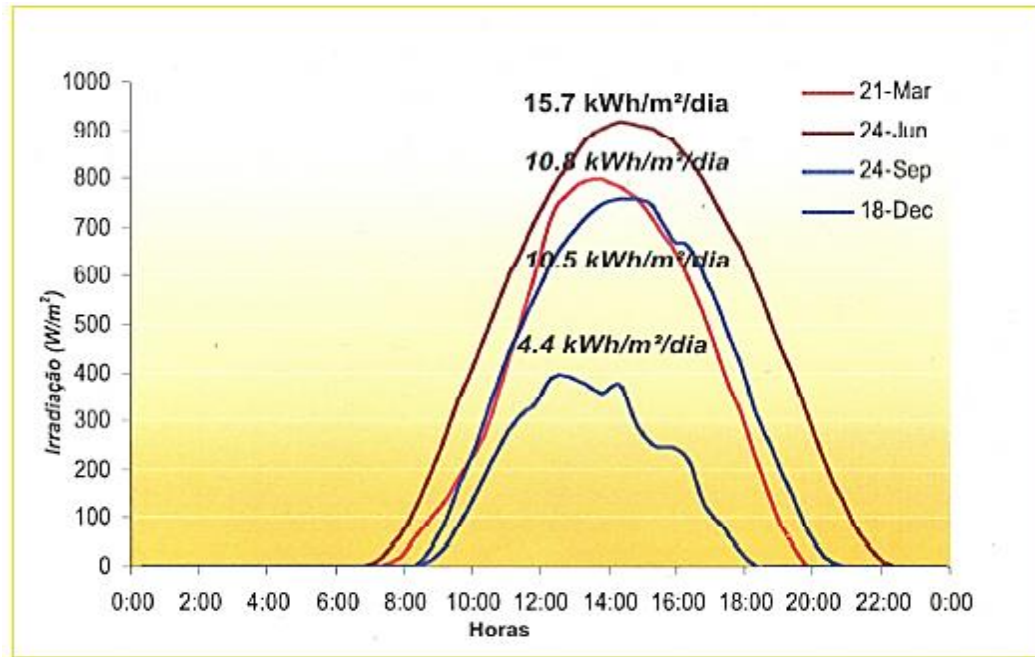


Figura 1 - Variação da radiação medida em Lisboa, numa placa horizontal [3]

Na Figura 1, é apresentada, a título de exemplo, a variação da radiação numa placa horizontal durante quatro dias distintos do ano em Lisboa, com especial destaque para as diferenças sazonais que se observam durante os períodos de Verão e Inverno. O comportamento aqui observado é idêntico em todo o território continental português, uma vez que a latitude varia apenas cerca de 4° entre o Norte e o Sul do país, sendo também notória a diminuição da irradiação nos meses de Inverno [3],[4].

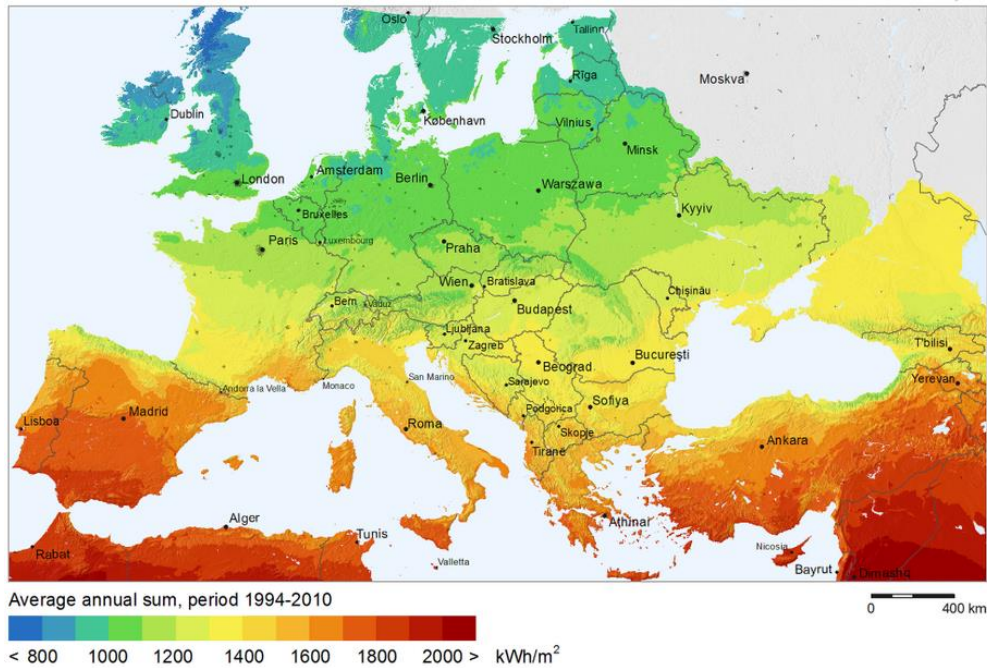


Figura 2 - Mapa de irradiação horizontal solar global na Europa (kWh m^{-2}) [4]

Em certas regiões localizadas perto do Equador, a irradiação solar pode exceder os 2300 kWh m^{-2} , enquanto que no Sul da Europa esse valor é de cerca de 1900 kWh m^{-2} . Em Portugal verificam-se valores anuais médios de cerca de 1500 kWh m^{-2} , tornando-se notável o extremo interesse do estudo de diferentes formas de utilização do potencial energético do país, bem como os benefícios socioeconómicos que daí advém [3].

CAPÍTULO II: ENERGIA SOLAR

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol, visto a partir da Terra, gira em torno do seu eixo cerca de uma vez a cada quatro semanas. Todavia, não o faz como um corpo sólido, levando entre 27 dias no equador e aproximadamente 30 dias nas regiões polares por cada rotação [5].

A radiação solar é definida como a quantidade de energia incidente numa determinada área do topo da atmosfera, e é a principal força motriz do clima na Terra. A intensidade da radiação solar, fora da atmosfera, depende da distância entre a Terra e o Sol, e a taxa a que a energia radiante incide sobre uma superfície perpendicular, por unidade de área, no limite exterior da atmosfera, define-se como constante solar ($G_{sc}/\text{W m}^{-2}$) e é em média 1367 W m^{-2} , podendo variar entre 1325 W m^{-2} e 1412 W m^{-2} , consoante o Sol esteja mais perto ou mais longe da Terra [6].

Apenas uma parte da radiação solar atinge a superfície da Terra, isto porque apesar de constante o seu valor, algumas condicionantes, como os ciclos solares, a órbita elíptica de translação à volta do Sol, o movimento de rotação e a inclinação do eixo, fazem com que uma parte seja absorvida e outra refletida para o espaço. Com céu limpo, independentemente da localização, e com os raios solares perpendiculares à superfície terrestre, a irradiância, ou seja, a radiação solar global, é de aproximadamente 1000 W m^{-2} [7],[8].

A variação da radiação emitida pelo Sol apresenta diferentes periodicidades e poderá estar relacionada com a atividade das manchas solares. Foi através do satélite *Nimbus 7* que, em 1982, Hickey *et al.*, acompanharam a evolução da constante solar, concluindo que existiam variações subtis (cerca de 0,02 % ao ano). O fluxo de radiação apresenta uma variabilidade de aproximadamente 3 % quando existem alterações na distância Terra-Sol e, fora da atmosfera, a radiação incidente num plano normal é dada por [5],[9]:

$$\begin{aligned} G_{on}/\text{W m}^{-2} = G_{sc}/\text{W m}^{-2}(1,000110 + 0,034221 \cos(B/^{\circ}) \\ + 0,001280 \sin(B/^{\circ}) + 0,000719 \cos(2B/^{\circ}) + 0,000077 \sin(2B/^{\circ})) \end{aligned} \quad (1)$$

Em que B é igual a:

$$B/^{\circ} = (n/\text{dias} - 1) \frac{360}{365} \quad (2)$$

2.2 MOVIMENTO DA TERRA

Como todos os corpos do universo, a Terra também se encontra em movimento. Os dois principais movimentos da Terra são o de rotação e translação. O movimento de rotação ocorre quando a Terra se move sobre si, ou seja, em torno do seu eixo no sentido anti-horário (de oeste para este). Já o movimento de translação ocorre à volta do Sol, numa trajetória elíptica, em que a distância entre a Terra e o Sol varia de $147,05 \times 10^6$ km, no periélio a $152,14 \times 10^6$ km no afélio [10].

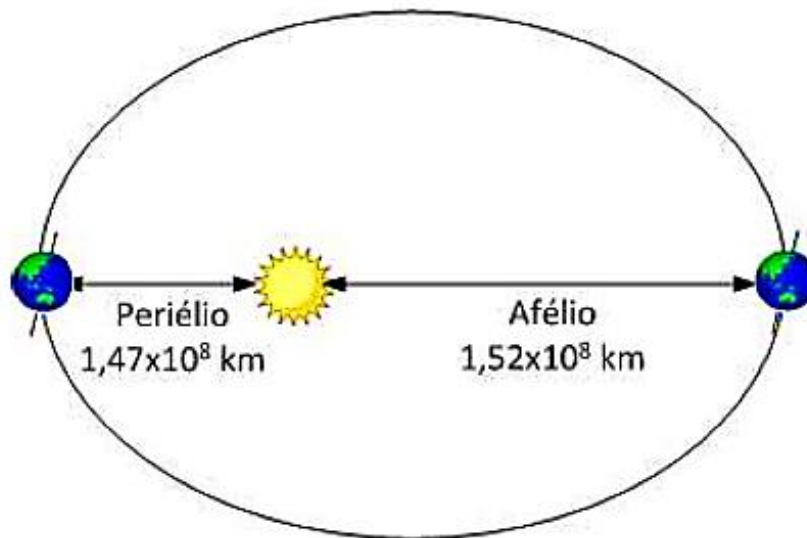


Figura 3 - Movimento da Terra à volta do Sol [10]

A Terra movimenta-se mais depressa quando está mais próxima do Sol, e mais devagar quando está mais afastada, comprovando a segunda lei de Kepler que diz que: “uma linha que se estenda do Sol a um planeta, orientada nesse sentido, varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais” [10]. O equador divide a Terra nos hemisférios norte e sul. Esta divisão apresenta-se de extrema importância para os estudos geográficos do planeta e proporciona uma referência para a localização de um determinado local. Os paralelos são círculos menores, paralelos ao equador e perpendiculares ao eixo da Terra. O Trópico de Câncer, com latitude de $23^{\circ} 27' N$, corresponde à declinação máxima alcançada pelo Sol no hemisfério norte. No hemisfério sul a declinação máxima alcançada pelo Sol ocorre à latitude de $23^{\circ} 27' S$ e chama-se Trópico de Capricórnio [8],[10].

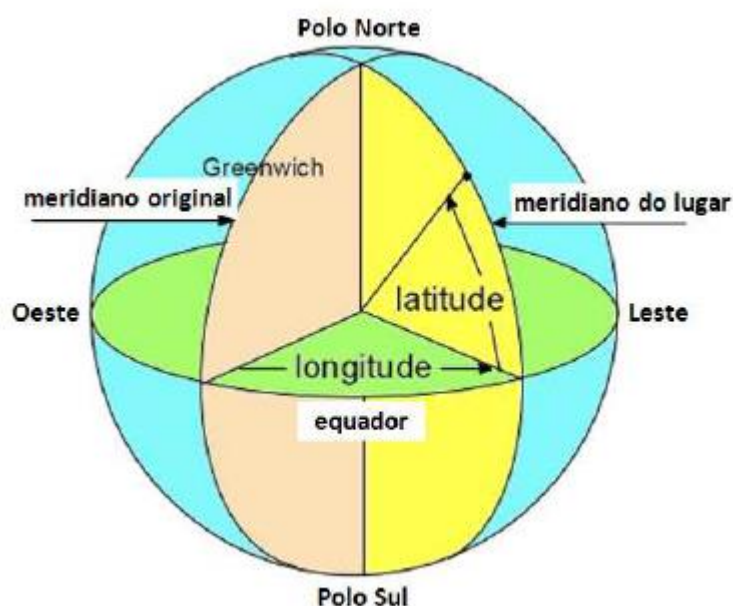


Figura 4 - Latitude e longitude [11]

A latitude $\phi/^{\circ}$, define-se como a distância angular de qualquer ponto da superfície terrestre em relação à linha do equador medida ao longo do meridiano, como mostra a Fig. 4. O equador é o marco inicial representando 0° e, a partir deste, estabelece-se a latitude Norte e Sul, que medem até $\pm 90^{\circ}$ (para Norte é positivo e para Sul negativo) [10].

O meridiano de Greenwich, que divide a Terra em Oriente e Ocidente, serve como referência para estabelecer as distâncias em longitude e fusos horários. A longitude varia entre 0° e $\pm 180^\circ$ e é definida como a distância angular ao meridiano, para este ou oeste, ao longo do equador [8],[10].

2.3 UNIDADES DE MEDIDA DE TEMPO

Na medição do tempo, consideram-se o tempo sideral e solar, baseando-se ambos no movimento de rotação da Terra. Enquanto o tempo sideral corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma determinada estrela pelo meridiano celeste local, o tempo solar baseia-se no movimento aparente do Sol (em que o Sol gira à volta da Terra) [8].

Para medir o tempo solar, consideram-se como unidades fundamentais o dia e o ano. Um dia solar corresponde ao intervalo de tempo (não necessariamente 24 horas) decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano do lugar, ou seja, duas culminações superiores consecutivas do Sol. É 3 min 56 s mais longo que o dia sideral, pois o Sol desloca-se no sentido contrário ao movimento diurno, isto é, de oeste para este [8].

Existem vários tipos de tempo solar, no entanto, pela dificuldade na medição do Tempo Solar Verdadeiro (TSV), devido à órbita elíptica da Terra à volta do Sol, utiliza-se o Tempo Solar Médio (TSM). O TSM é fictício e move-se ao longo do equador celeste, num movimento uniforme, tendo sempre 24 horas. Cada hora média corresponde a 15° de longitude, pois o TSM completa uma volta em 24 horas. Como a duração do ano solar é de 365,24 dias, a cada quatro anos adiciona-se mais um dia, sendo estes os anos bissextos [12].

É necessário converter o tempo padrão em tempo solar através de duas correções. Primeiro, para se obter a hora solar verdadeira é necessário converter a hora legal em hora local média, através da correção da longitude, e depois converter a hora solar média em hora solar verdadeira através da equação do tempo [12].

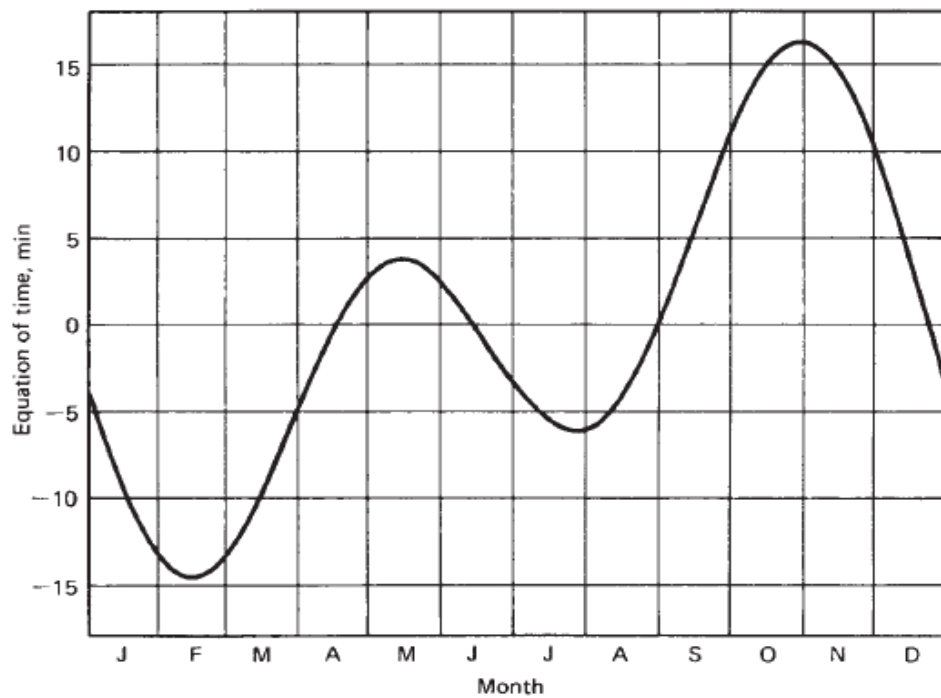


Figura 5 - Equação do tempo ao longo do ano [5]

A diferença, em minutos, entre a hora solar e a hora legal é mostrada na Equação (3), onde L_{st} (longitude padrão do meridiano para o fuso horário local) e L_{loc} (longitude local) são positivas a este de Greenwich e negativas a oeste. O fator 4 representa o facto de a Terra rodar 1° a cada 4 min e o parâmetro E corresponde à equação do tempo, em minutos e é função da altura do ano. Na Fig. 5 pode ver-se o adiantamento ou atraso (em minutos) do tempo solar verdadeiro em relação ao tempo solar médio [5],[13].

$$\text{Hora solar/min} = \text{Hora legal/min} + 4(L_{st}/^\circ - L_{loc}/^\circ) + E/\text{min} \quad (3)$$

As equações de tempo e deslocamento a partir do meridiano padrão, são ambas expressas em min e, existe uma diferença de 60 min entre a hora de Verão e o tempo padrão [5].

2.4 MASSA DE AR

O coeficiente de massa de ar AM (do inglês *Air Mass*), pode ser definido como a relação entre o percurso ótico que a radiação solar direta efetua até atingir a superfície de um dado lugar, e o percurso dos raios solares na atmosfera, estando o Sol no zénite. Este coeficiente é normalmente utilizado para caracterizar o desempenho de células solares sob condições padronizadas [14].

Dependendo da altura do Sol, a massa de ar a ser atravessada será maior ou menor, influenciando a radiação solar recebida na superfície da Terra. Deste modo, ao nível médio das águas do mar, ‘AM1’, que se traduz na mínima massa de ar que seria atravessada pela radiação solar se o Sol estivesse situado no zénite. Esta definição é útil para estimar o desempenho de células solares em regiões equatoriais e tropicais. A designação de ‘AM1.5’ é quase universal para caracterizar painéis de geração de energia a latitudes temperadas e, corresponde a um ângulo zénite de 48,2°. Quando o Sol está mais baixo no céu, o percurso dos raios solares através da atmosfera é mais longo e a energia que chega até nós é menor. Na posição em que faz um ângulo de 30° com a horizontal (ou $\theta_z = 60^\circ$), o percurso através da atmosfera é duas vezes maior, então expressa-se por ‘AM2’. Para ângulos zénite entre 0° e 70° ao nível do mar, a massa de ar pode ser calculada de forma aproximada por [15],[16]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z / ^\circ} \quad (4)$$

Quando o ângulo zénite é superior a 70°, devido à curvatura da Terra, a Eq. (4) deixa de ter utilidade. Deste modo, Kasten e Young (1989) sugerem que a massa de ar seja calculada por [5]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z / ^\circ + 0,50572(96,07995 - \theta_z / ^\circ)^{-1,6364}} \quad (5)$$

2.5 ÂNGULOS SOLARES

Os ângulos solares têm como objetivo determinar a posição do Sol no céu, como a declinação solar, o azimute e a altura solar.

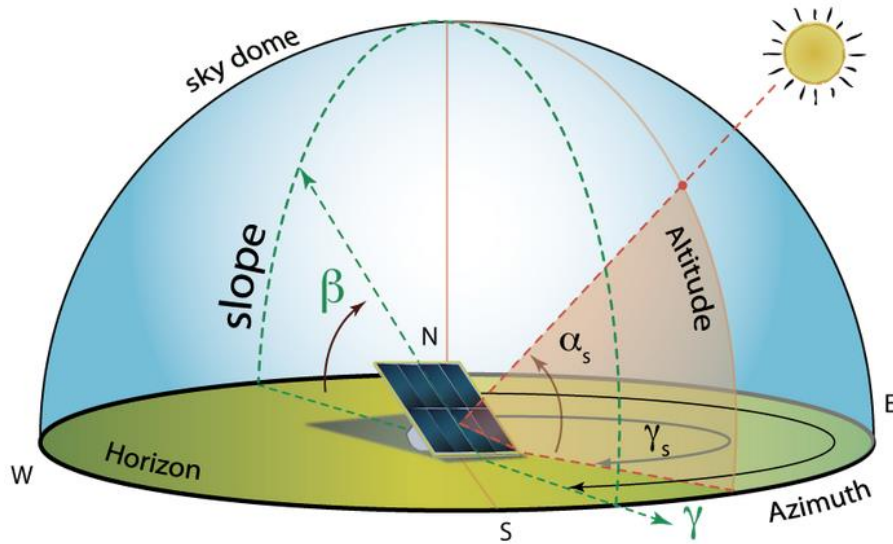


Figura 6 - Ângulos solares [17]

2.5.1 DECLINAÇÃO SOLAR

A declinação solar $\delta/^\circ$, é, conforme ilustrado na Figura 7, o ângulo formado entre o plano do equador e uma linha reta definida entre o centro do Sol e da terra. A radiação solar atinge a superfície da terra com um ângulo de inclinação que se altera ao longo do ano, sendo que no hemisfério norte, varia entre a máxima de $23,45^\circ$, no solstício de Verão e a mínima, de $-23,45^\circ$ no solstício de Inverno. Nos equinócios da Primavera e Outono os dias têm duração igual às noites, sendo a declinação solar nula. A Eq. (6) permite calcular o valor da declinação solar através da equação aproximada de Cooper (1969) [18],[19].

$$\delta/^\circ = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n/\text{dias}}{365}\right) \quad (6)$$

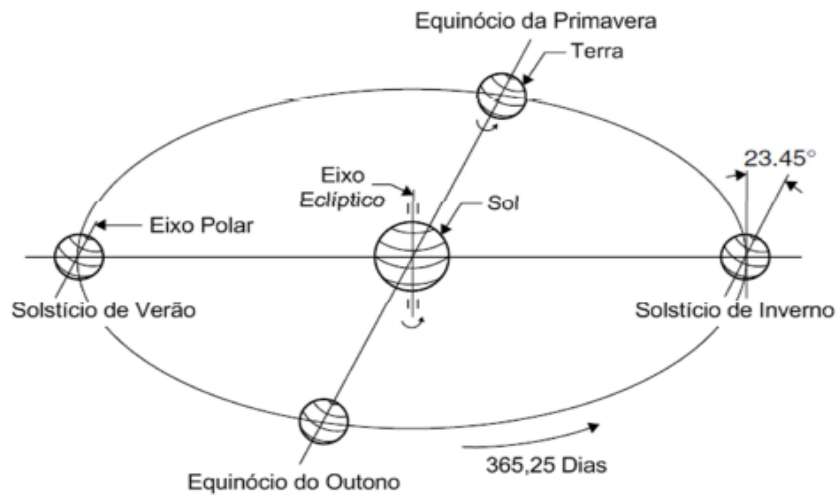


Figura 7 - Declinação solar no hemisfério norte [20]

Tabela 1 - Dia médio do mês e valores de n por mês^a [5]

Mês	n para i dia do mês	Para o dia médio do mês		
		Dia	n	δ
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	-13,0
Março	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Maio	$120 + i$	15	135	18,8
Junho	$151 + i$	11	162	23,1
Julho	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setembro	$243 + i$	15	258	2,2
Outubro	$273 + i$	15	288	-9,6
Novembro	$304 + i$	14	318	-18,9
Dezembro	$334 + i$	10	344	-23,0

^a Fonte: Klein (1977). Não utilizar para valores de $|\phi| > 66,5^\circ$

2.5.2 ÂNGULOS HORÁRIOS SOLARES

A posição do Sol tem extrema importância no posicionamento de um painel solar e, pode ser obtida através da determinação dos ângulos de azimute ($\gamma_s/^\circ$) e altura solar ($\alpha_s/^\circ$). O ângulo horário solar, $\omega/^\circ$, é definido como desfasamento angular do Sol, devido à rotação da Terra sobre o seu eixo. Contado a partir do meio-dia solar, em que $\omega/^\circ = 0$, cada hora corresponde a 15° , sendo que de manhã é negativo e de tarde positivo [13],[20].

O nascer-do-sol define-se como o momento em que o Sol aparece no horizonte. Do mesmo modo, o pôr-do-sol ocorre quando o Sol desaparece no horizonte. No entanto, é necessário ter em conta que mudanças de pressão do ar, humidade relativa e latitudes mais elevadas, influenciam a que ocorram erros no cálculo tanto do nascer como pôr-do-sol. Para superfícies horizontais, $\theta_z/^\circ = 90$ e o ângulo de pôr-do-sol é calculado pela Eq. (7). O ângulo de nascer-do-sol é calculado de igual forma, mas com sinal negativo pelo facto de ocorrer antes do meio-dia solar [5],[9].

$$\omega_s/^\circ = \cos^{-1}[-\tan(\phi/^\circ)\tan(\delta/^\circ)] \quad (7)$$

Para superfícies verticais, $\theta/^\circ = 90$ e o ângulo do pôr-do-sol pode ser determinado pela Equação (8).

$$\omega'_s/^\circ = \cos^{-1}[-\tan(\phi/^\circ - \beta/^\circ)\tan(\delta/^\circ)] \quad (8)$$

No hemisfério norte, durante o Verão a declinação solar é superior a zero e, $\omega_s/^\circ > \omega'_s/^\circ$ ou seja, uma superfície horizontal recebe primeiro o Sol que uma superfície inclinada. Por sua vez, no Inverno, ocorre o inverso. Como tal facto é fisicamente impossível, então:

$$\omega'_s/^\circ = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan(\phi/^\circ)\tan(\delta/^\circ)) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi/^\circ - \beta/^\circ)\tan(\delta/^\circ)) \end{array} \right] \quad (9)$$

O índice ‘min’ significa que será utilizado o menor valor dos dois itens e o número de horas de luz do dia é determinado pela Eq. (10) [5],[13].

$$N/h = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(\phi/^{\circ}) \tan(\delta/^{\circ})] \quad (10)$$

2.5.3 POSIÇÃO DO SOL

A posição do sol é função da latitude, declinação e ângulo horário (U.S Hydrographic Office, 1940) e, como referido anteriormente, pode ser determinada através da altura solar ($\alpha_s/^{\circ}$) e do ângulo de azimute ($\gamma_s/^{\circ}$). A altura solar, ou zénite, é caracterizada pelo momento em que os raios solares incidem verticalmente sobre um plano horizontal. Esta será máxima no solstício de Verão e mínima no solstício de Inverno, e pode ser calculada por [21],[22]:

$$\sin(\alpha_s/^{\circ}) = \cos(\theta_z/^{\circ}) = \cos(\phi/^{\circ}) \cos(\delta/^{\circ}) \cos(\omega/^{\circ}) + \sin(\phi/^{\circ}) \sin(\delta/^{\circ}) \quad (11)$$

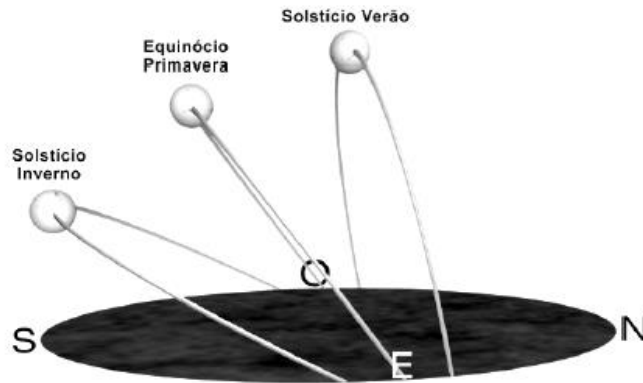


Figura 8 - Posição do Sol ao longo do ano [23]

O ângulo de azimute solar (γ_s), é o deslocamento angular da projeção dos raios solares no plano horizontal, ou seja, este ângulo define a direção do movimento do Sol e está compreendido entre -180° e $+180^\circ$. No hemisfério norte é medido a partir do Sul, e no hemisfério sul a partir do Norte. Varia com a latitude e época do ano, adquirindo valor positivo ou negativo consoante o valor do ângulo horário, ou seja, o sinal da função será positivo ou negativo conforme $\omega/^\circ$ for determinado para antes ou depois do meio-dia [18],[24].

$$\gamma_s/^\circ = \text{sign}(\omega/^\circ) \left| \cos^{-1} \frac{\cos(\theta_z/^\circ) \sin(\phi/^\circ) - \sin(\delta/^\circ)}{\sin(\theta_z/^\circ) \cos(\phi/^\circ)} \right| \quad (12)$$

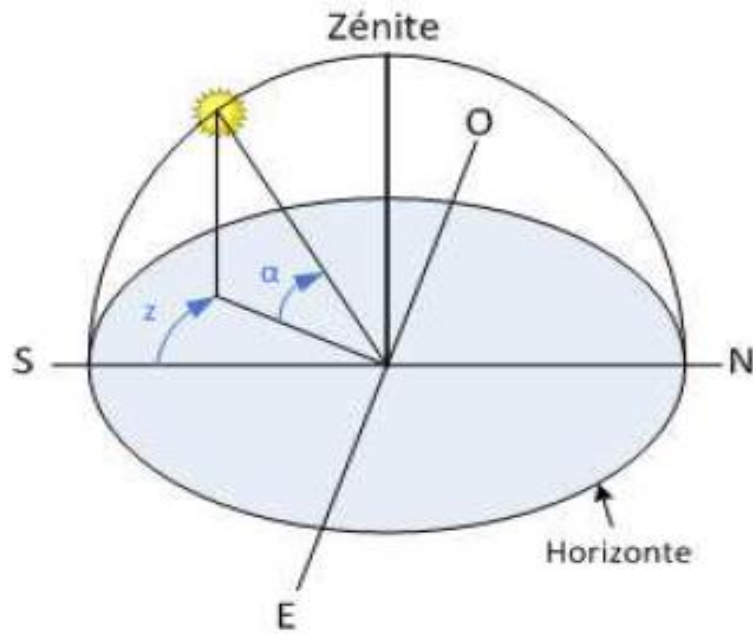


Figura 9 - Representação da altura solar no hemisfério norte [20]

CAPÍTULO III: A ENERGIA QUE CHEGA AO COLETOR

Só é possível prever o desempenho de processos solares através da utilização de estimativas e/ou medições efetuadas no passado, no local em questão ou em locais próximos com características idênticas. Rietveld [25] propõe um modelo para estimar a média mensal da radiação global diária (H) com base na latitude do local, outros modelos propostos, baseiam-se na média mensal diária de horas de luz. Contudo, a maioria da informação disponível é sobre a radiação global incidente numa superfície horizontal, por hora, o que se torna útil em simulações de processos solares. Existem também dados disponíveis para superfícies inclinadas, considerando intervalos de tempo mais curtos. São estes dados os princípios mais básicos e importantes do ponto de vista da utilização da energia solar [15],[26].

3.1 RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES INCLINADAS

Com o propósito de aumentar a radiação incidente no coletor, estes são comumente instalados não horizontalmente, mas com uma inclinação que vai variar em função de diversos fatores, bem como a sua orientação em relação ao meridiano. Um dos problemas a ser transposto é o facto de, geralmente, apenas serem conhecidos os dados de radiação sobre superfícies horizontais. Para contornar esse problema, é necessário conhecer a direção a partir da qual a radiação direta e difusa incidem na superfície em questão. De notar que, embora não discutido neste capítulo, a direção da radiação difusa sofre alterações devido às condições de nebulosidade e clareza atmosférica. A radiação solar incidente é a soma de um conjunto de fluxos, e é determinada através da Eq. (13) [5],[27],[28].

$$\begin{aligned} I_T / \text{MJ m}^{-2} = & I_{T,b} / \text{MJ m}^{-2} + I_{T,d,iso} / \text{MJ m}^{-2} + I_{T,d,cs} / \text{MJ m}^{-2} \\ & + I_{T,d,hz} / \text{MJ m}^{-2} + I_{T,refl} / \text{MJ m}^{-2} \end{aligned} \quad (13)$$

Onde:

$I_{T,b}$ - Radiação solar direta incidente numa superfície inclinada

$I_{T,d,iso}$ - Radiação solar difusa isotrópica incidente numa superfície inclinada

- $I_{T,d,cs}$ - Radiação solar difusa circumsolar incidente numa superfície inclinada
 $I_{T,d,hz}$ - Radiação solar difusa horizontal incidente numa superfície inclinada
 $I_{T,refl}$ - Radiação solar refletida numa superfície inclinada

As equações podem ser escritas em termos de I , quando se referem a um período horário, ou em termos de G , quando se trata de radiância. Após determinar a radiação solar incidente, é possível calcular a razão entre a radiação total numa superfície inclinada para uma superfície horizontal:

$$R = \frac{I_T / \text{MJ m}^{-2}}{I / \text{MJ m}^{-2}} \quad (14)$$

Podem verificar-se problemas quando se calcula a radiação sobre uma superfície inclinada porque, devido à reflexão das nuvens e/ou refração atmosférica, podem ser obtidos erradamente dados antes ou após o nascer e pôr-do-sol. Considerando que a radiação direta predomina e que a difusa e refletida (do solo) são concentradas na área do Sol, é possível assumir que $R = R_b$ e toda a radiações é considerada direta [5],[27].

$$R_b = \frac{\cos \theta / ^\circ}{\cos \theta_z / ^\circ} \quad (15)$$

Na Figura 10 verifica-se que o ângulo de incidência $\theta / ^\circ$ a uma determinada latitude $\phi / ^\circ$, é igual ao ângulo zénite $\theta_z / ^\circ$ a uma latitude de $(\phi / ^\circ - \beta / ^\circ)$, e, para o hemisfério norte, pode ser calculado pela Eq. (16) [5],[27].

$$\cos \theta / ^\circ = \cos(\phi / ^\circ - \beta / ^\circ) \cos(\delta / ^\circ) \cos(\omega / ^\circ) + \sin(\phi / ^\circ - \beta / ^\circ) \sin(\delta / ^\circ) \quad (16)$$

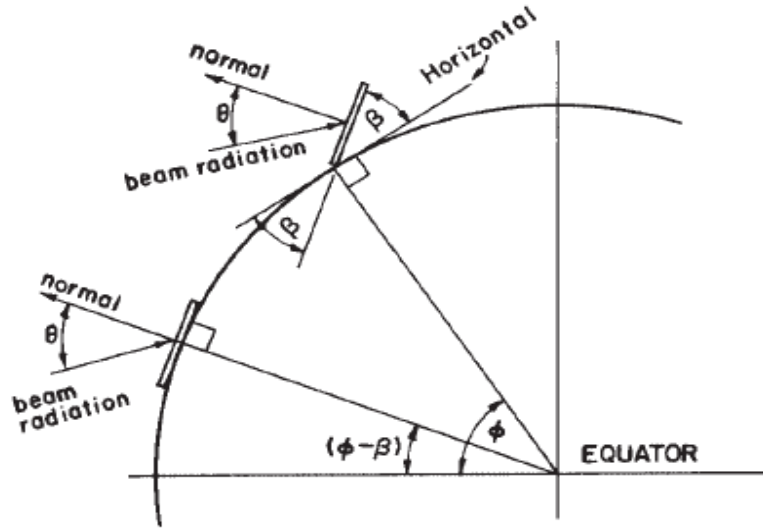


Figura 10 - Posição do sol em relação a um plano inclinado [5]

É necessária especial atenção em relação ao ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície pois, caso o ângulo $\theta/^\circ$ exceda os 90° , significa que a Terra está a bloquear o Sol, ou seja, apesar de o Sol nascer no horizonte a uma determinada hora, só incide no coletor momentos mais tarde [13].

3.2 RADIAÇÃO FORA DA ATMOSFERA NUMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL

O cálculo da radiação incidente é convenientemente efetuado, partindo do pressuposto que não existe atmosfera. Deste modo, a radiação solar incidente num plano horizontal fora da atmosfera é calculada pela Eq. (1) dividida pela Eq. (15) resultando em [25],[29]:

$$G_o / \text{W m}^{-2} = G_{sc} / \text{W m}^{-2} \left[1 + \cos \left(\frac{360^\circ n / \text{dias}}{365 / \text{dias}} \right) \right] \cos(\theta_z / ^\circ) \quad (17)$$

Normalmente, é necessário calcular a radiação solar diária ($H_o / \text{MJ m}^{-2}$). Para tal, através da integração da Eq. (17) obtém-se:

$$H_o / \text{MJ m}^{-2} = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} / \text{W m}^{-2} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360^\circ n / \text{dias}}{365 / \text{dias}} \right) \right] \times \left(\cos(\phi / ^\circ) \cos(\delta / ^\circ) \cos(\omega_s / ^\circ) + \left(\frac{\pi \omega_s / ^\circ}{180} \right) \sin(\phi / ^\circ) \sin(\delta / ^\circ) \right) \quad (18)$$

Para que se obtenha a radiação horária ($I_o / \text{MJ m}^{-2}$) para um período entre $\omega_1 / ^\circ$ e $\omega_2 / ^\circ$, procede-se de igual forma, ou seja, através da integração da Eq. (17). Esta poderá ser diferente de uma hora, conforme os limites estabelecidos [5].

$$I_o / \text{MJ m}^{-2} = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} / \text{W m}^{-2} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360^\circ n / \text{dias}}{365 / \text{dias}} \right) \right] \times \left[\cos(\phi / ^\circ) \cos \delta / ^\circ (\sin \omega_2 / ^\circ - \sin \omega_1 / ^\circ) + \frac{\pi(\omega_2 / ^\circ - \omega_1 / ^\circ)}{180} \sin(\phi / ^\circ) \sin(\delta / ^\circ) \right] \quad (19)$$

3.3 RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES MÓVEIS

Como o nome indica, um painel solar móvel é aquele que permite rastrear os movimentos do Sol permitindo, deste modo, diminuir o ângulo de incidência dos raios solares sobre a sua superfície, maximizando a radiação solar incidente no painel [28].

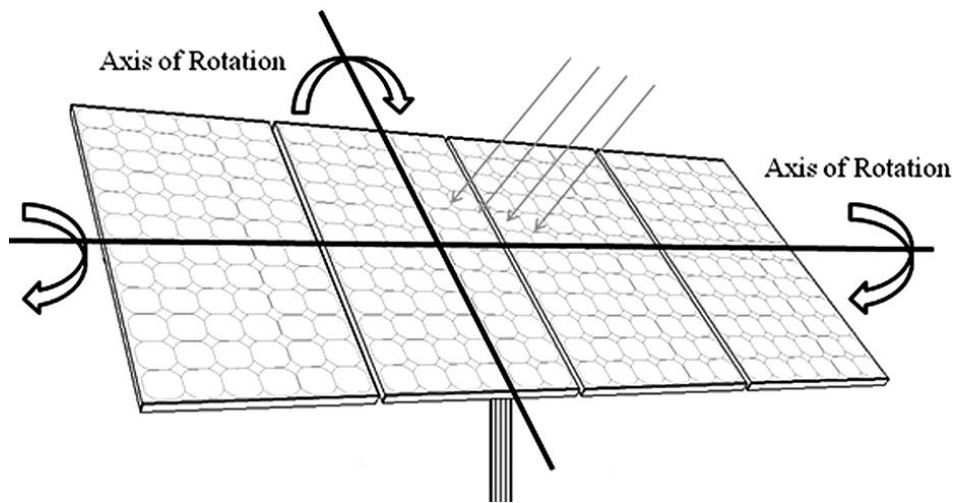


Figura 11 - Eixos de rotação do painel móvel [30]

Num coletor de dois eixos, ou seja, aquele que rastreia continuamente o Sol, a superfície mantém-se constantemente perpendicular aos raios solares de modo a que a sua inclinação seja sempre igual ao ângulo de zénite solar. Quando o painel é virado a Sul, o ângulo de azimute da superfície é de 0° e como rastreia o Sol, $\gamma/^\circ = \gamma_s/^\circ$ [31].

$$\cos \theta/^\circ = 1 \quad (20)$$

$$\beta/^\circ = \theta_z/^\circ \quad (21)$$

$$\gamma/^\circ = \gamma_s/^\circ \quad (22)$$

CAPÍTULO IV: ORIENTAÇÃO DO COLETOR SOLAR

A conversão de energia solar é uma realidade atual, podendo esta ser convertida em eletricidade, através de células fotovoltaicas, tanto para microprodução em habitações particulares, como em centrais na ordem dos megawatts (MW), e em energia térmica para aquecimento de água ou ar. Só através de medições e uma monitorização continua é possível o conhecimento da radiação solar incidente num determinado local. A medição pode ser efetuada por três tipos de sensores que se diferenciam pelo tipo de radiação a medir [6],[18],[32].

O piranómetro (*vide* Fig. 12), é um instrumento meteorológico utilizado para medir a radiação solar direta e difusa proveniente de todas as direções. Como tal, a sua instalação deve ser efetuada numa superfície horizontal de forma a assegurar o seu correto funcionamento. Com o objetivo de se eliminar a radiação direta, é utilizada uma banda de sombreamento na superfície do piranómetro [28],[33].

O pireliómetro permite visualizar apenas o Sol, e uma pequena área circundante deste, e é utilizado para medir a radiação direta. Atualmente já existem no mercado sistemas de rastreamento que incorporam os dois equipamentos descritos anteriormente. São projetados para incorporar na base de sustentação horizontal o piranómetro, e no rastreador solar o pireliómetro [5],[34].

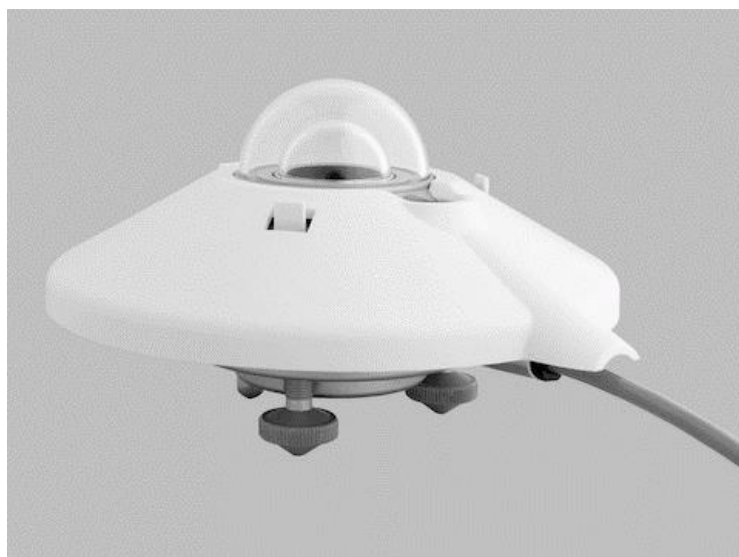


Figura 12 - Piranómetro [35]

Para que se obtenha o máximo rendimento de um coletor solar, este deve ser direcionado para o Sol, no entanto, é necessário considerar diversas variáveis para que se consiga o ajuste ideal e a melhor direção. A localização geográfica é um dos principais fatores a ter em conta, sendo que para o caso de painéis solares instalados no hemisfério norte, estes devem ser direcionados para o hemisfério sul e vice-versa [36],[37].

Por fim, é necessário saber em que ângulo, a partir da horizontal, deve estar inclinado o painel, de modo a que os raios solares incidam perpendicularmente. Essa inclinação varia em função da altura solar e será calculada para o meio – dia solar, uma vez que varia ao longo do dia e do ano [33],[37].

Como descrito anteriormente, os painéis podem ainda ser fixos ou móveis. No entanto, pelo facto de a posição do Sol variar ao longo do ano (mais alto no Verão e mais baixo no Inverno), é possível obter maior rendimento caso se opte por painéis móveis.

4.1 PAINEL SOLAR FIXO

Quando o painel solar não apresenta nenhum sistema de rastreamento solar diz-se que é fixo. Este pode possuir uma inclinação fixa durante todo o ano, ou ser ajustável sazonalmente. É necessário, porém considerar as variações de altitude, relevo e particularidades climáticas de cada região para que seja encontrado o ângulo ótimo para cada painel solar, não esquecendo as desvantagens a ele associadas, nomeadamente a menor energia captada em comparação com painéis móveis [36],[38]

A inclinação ótima do painel não é consensual entre todos os autores. Ao longo dos anos foram efetuados diversos estudos com a finalidade de determinar o melhor ângulo de inclinação dos painéis solares. Nesses estudos, as estimativas foram efetuadas para ajustes mensais, sazonais e anuais. Diversos autores apresentam modelos de radiação solar para determinar o ângulo de inclinação ótimo, entre eles encontram-se os estudos de Hay-David- Klucler- Reindl, Liu & Jordan, e Hottel & Weertz [39], que mostram resultados globais ótimos, mas não permitem ajustes mensais. Outros estudos apresentam diversas recomendações para o ângulo de inclinação ótimo dos painéis fixos através da utilização das inclinações de $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} \pm 15$ [5], $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} - 10$ [40], $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} + (10 \dots 30)$

[41], $\beta/^{\circ} = 0,917\phi/^{\circ} + 0,321$ [42], $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ}$ [43]. A inclinação pode manter-se constante para cada mês ou estação do ano [44].

De acordo com Charles R. Laudau [37], para determinar o melhor ângulo de inclinação do painel fixo todo o ano, para latitudes entre 25° e 50° , considera-se:

$$\beta/^{\circ} = 0,76 \phi/^{\circ} + 3,1 \quad (23)$$

Quando se opta pelo ajuste duas vezes ao ano, e para latitudes compreendidas entre os 25° e 50° , o melhor ângulo de inclinação é dado por:

Verão: $\beta/^{\circ} = 0,93 \phi/^{\circ} - 21 \quad (24)$

Inverno: $\beta/^{\circ} = 0,875 \phi/^{\circ} + 19,2 \quad (25)$

E as datas em que o painel deve ser ajustado estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa das melhores datas considerando ajuste 2×/ano [37]

Ajuste do ângulo	Hemisfério Norte	Hemisfério Sul
Verão	30 de março	29 de setembro
Inverno	12 de setembro	14 de março

O mesmo autor [37], afirma que a melhor forma para se obter mais energia incidente é através do ajuste da inclinação do painel quatro vezes ao ano. Este é o melhor ajuste caso esteja conectado à rede e se pretenda utilizar ou vender toda a energia produzida. Para tal, são consideradas as inclinações de:

$$\text{Verão:} \quad \beta/^{\circ} = 0,92 \phi/^{\circ} - 24,3 \quad (26)$$

$$\text{Primavera/Outono} \quad \beta/^{\circ} = 0,98 \phi/^{\circ} - 2,3 \quad (27)$$

$$\text{Inverno} \quad \beta/^{\circ} = 0,89 \phi/^{\circ} + 24 \quad (28)$$

A tabela seguinte (*vide* Tab. 3), mostra as datas em que os ajustes devem ser efetuados, quando o painel é ajustado quatro vezes ao ano.

Tabela 3 - Estimativa das melhores datas considerando o ajuste 4×/ano [37]

Ajuste do ângulo	Hemisfério Norte	Hemisfério Sul
Verão	18 de abril	18 de outubro
Outono	24 de agosto	23 de fevereiro
Inverno	7 de outubro	8 de abril
Primavera	5 de março	4 de setembro

Nas estações do Verão e Primavera/Outono o Sol atravessa uma grande área do céu, diminuindo a eficiência do painel solar fixo, com valores na ordem dos 68 % - 74 %. Por sua vez, como no Inverno o Sol está mais baixo no céu, um painel solar fixo direcionado diretamente para o Sol será relativamente eficiente (captando entre 81 % a 88 %) [37],[45].

A Figura 13 mostra a relação entre a radiação sobre uma superfície horizontal e sobre uma superfície inclinada.

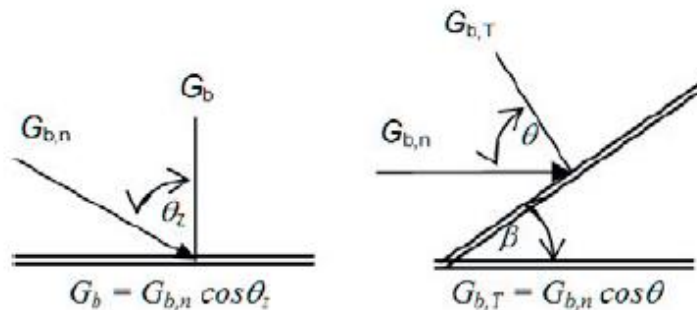


Figura 13 - Radiação solar incidente num plano horizontal e inclinado respetivamente [5]

Quando a superfície é inclinada, os raios solares vão atingir perpendicularmente a superfície aumentando a quantidade de radiação recebida. Por sua vez, ao considerar uma superfície horizontal, o ângulo de incidência assume valores entre 0° e 90° . O ângulo de inclinação é positivo quando o painel solar enfrenta o equador, ou seja, no hemisfério norte está direcionado a Sul e vice-versa. Quando o painel está posicionado na horizontal, o ângulo de inclinação é nulo e, raramente, quando este é negativo significa que o painel está virado para fora do equador [36],[45].

4.2 PAINEL SOLAR MÓVEL

Diversos autores afirmam que sistemas com seguimento solar podem aumentar a produção em 40 % ou mais, comparativamente aos sistemas fixos, não descurando, no entanto, que existirá um aumento da carga consumida devido à presença dos sistemas de medição e dos motores. Além disso, aspetos como o local de instalação, espaço e manutenção poderão influenciar a percentagem de energia captada [23],[46].

Relativamente ao número de eixos, os painéis móveis podem ser classificados como sistemas de eixo único ou de eixo duplo. Os painéis de eixo único permitem ao painel girar em volta de um eixo vertical, polar ou horizontal, seguindo o Sol segundo a direção Este-Oeste ou Norte-Sul (paralelo ao eixo de rotação da Terra e dependente da latitude do local). Este tipo de sistemas possui a vantagem de serem simples e de menor consumo de energia, pois utiliza apenas um motor [47],[48].

Os sistemas de eixo duplo combinam o eixo horizontal com o eixo vertical, permitindo o acompanhamento total do Sol, aumentando o rendimento comparativamente aos sistemas fixos e de eixo único. Apresentam como desvantagem o aumento do consumo e complexidade pois possuem mais um motor [46],[49].

CAPÍTULO V: RESULTADOS

Tratando-se de um estudo teórico, neste capítulo é apresentada a comparação entre os painéis fixo e ajustável duas (Verão e Inverno) e quatro vezes ao ano (Verão, Primavera/Outono e Inverno). A otimização dos resultados foi efetuada através do programa *Visual Basic*.

Neste estudo, o processo de otimização baseia-se em determinar $\beta/^\circ$ tal que:

$$\max_{\beta}: f(\beta)/^\circ = \sum_{i=1}^{n_{rad}} G/W \text{ m}^{-2} \approx \eta(\beta/^\circ), \quad i = 1, \dots, n \quad (29)$$

Em que:

$N_{ajustes} \leq N_{ajustes_{máx}}$ é uma restrição considerada

n é o número de posições pretendidas.

Os resultados foram obtidos para o dia médio de cada mês, conforme ilustrado na Tabela 1 e foram efetuados para três cidades portuguesas, nomeadamente Aveiro, Ponta Delgada e Funchal. Os equinócios de Primavera e Outono ocorrem a 20 de março e 22 de setembro, respetivamente, e o solstício de Verão a 20 de junho e de Inverno a 21 de dezembro.

Tabela 4 - Latitude e longitude das cidades consideradas [2]

Cidade	Latitude	Longitude
Aveiro	40°38'N	08°39'W
Ponta Delgada	38°45'N	23°13'W
Funchal	32°38'N	16°53'W

A orientação ótima de um painel fixo não é tão óbvia como se esperaria. Na prática, é recomendado que, quando instalados a Norte do equador, estes sejam virados para Sul

com uma inclinação $\beta/^\circ$, em relação ao plano horizontal. No entanto, como o Sol está mais alto no Verão e mais baixo no Inverno, é possível maximizar o rendimento do painel, ajustando a inclinação de acordo com as estações do ano. O presente projeto, apresenta os efeitos em termos da radiação incidente entre painéis fixos, ajustados duas e quatro vezes ao ano e um painel que rastreia o Sol continuamente, que será considerado o painel de referência. Na Tab. 5 estão apresentadas as inclinações usadas no painel fixo todo o ano [37], [40], [43].

Tabela 5 - Inclinações utilizadas para o painel fixo

Tipo de Painel	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Fixo	$\beta/^\circ = \phi/^\circ - 10$	$\beta/^\circ = 0,76 \phi/^\circ + 3,1$	$\beta/^\circ = \phi/^\circ$

De acordo com a literatura que serviu de base a este estudo [5], [37], os ângulos de inclinação $\beta/^\circ$, para o painel ajustável duas vezes ao ano estão representados na Tab. 6.

Tabela 6 - Inclinações utilizadas para o painel ajustável 2×/ano

Painel	Modelo 1		Modelo 2	
Ajustável 2×/ano	Verão $\beta/^\circ = 0,93 \phi/^\circ - 21$	Inverno $\beta/^\circ = 0,875 \phi/^\circ + 19,2$	Verão $\beta/^\circ = \phi/^\circ - 15$	Inverno $\beta/^\circ = \phi/^\circ + 15$

Por fim, para o ajuste quatro vezes ao ano, foram utilizados os seguintes valores de $\beta/^\circ$ (*vide* Tab. 7).

Tabela 7 - Inclinações utilizadas para o painel ajustável 4×/ano

Painel	Estação do ano		
Ajustável 4×/ano	Verão $\beta/^\circ = 0,92 \phi/^\circ - 24,3$	Primavera/Outono $\beta/^\circ = 0,98 \phi/^\circ - 2,3$	Inverno $\beta/^\circ = 0,89 \phi/^\circ + 24$

Como apenas Charles R. Laudau [37] propõe as datas em que os ajustes devem ser efetuados, foram consideradas as mesmas datas para os ajustes efetuados duas vezes ao ano, ou seja, o ajuste de Verão é efetuado no dia 30 de março e o ajuste de Inverno no dia 12 de setembro, o que corresponde a 10 dias depois e 10 dias antes dos equinócios, respetivamente. As datas dos ajustes quatro vezes ao ano foram apresentadas na Tab. 3.

Para projetar os processos solares e consequente cálculo de desempenho, é necessário calcular a relação entre a radiação incidente num coletor plano, $G_T / \text{W m}^{-2}$ e a radiação incidente num coletor de eixo duplo que rastreia continuamente o Sol, $G_n / \text{W m}^{-2}$ de modo a minimizar o ângulo de incidência, ou seja, $\cos \theta / ^\circ = 1$.

Na secção 2.4 foi descrito que a intensidade solar que chega ao coletor é reduzida com o aumento do coeficiente de massa de ar. Um modelo aproximado da radiação incidente num coletor de eixo duplo, tendo em consideração a massa de ar pode ser calculado por [50],[51]:

$$G_n / \text{W m}^{-2} = 1,1 (G_{sc} / \text{W m}^{-2}) 0,7^{m^{0,678}} \quad (30)$$

Constantes:

1,1 - Resulta do facto de se admitir que a componente difusa representa 10 % da radiação direta;

0,7 - Deve-se ao facto de que cerca de 70 % da radiação incidente ser transmitida para a Terra;

0,678 - É resultado de um ajuste empírico dos dados observados tendo em consideração a não uniformidade das camadas atmosféricas.

Em qualquer instante, a radiação incidente numa superfície é função de $G_n / \text{W m}^{-2}$ e o feixe de radiação incidente num plano pode ser calculado por[5]:

$$G_T / \text{W m}^{-2} = G_n / \text{W m}^{-2} \cos(\theta / ^\circ) \quad (31)$$

A média diária da radiação incidente no coletor móvel e no coletor plano é calculada através da integração das Equações (30) e (31) respetivamente.

$$H_n / \text{MJ m}^{-2} = \int_{-\omega_s/^{\circ}}^{\omega_s/^{\circ}} G_n / \text{W m}^{-2} d\omega \quad (32)$$

$$H_T / \text{MJ m}^{-2} = \int_{-\omega'_s/^{\circ}}^{\omega'_s/^{\circ}} G_T / \text{W m}^{-2} d\omega \quad (33)$$

Assim, o rendimento diário da radiação incidente no coletor inclinado pode ser calculado por:

$$\eta = \frac{H_T / \text{MJ m}^{-2}}{H_n / \text{MJ m}^{-2}} \quad (34)$$

Os ângulos da hora solar foram calculados conforme as Equações (7) e (9). Como o painel móvel rastreia continuamente o Sol, este vai ser calculado entre o nascer e o pôr-do-Sol verdadeiro, ou seja, a partir do momento em que o Sol aparece no horizonte a radiação começa a incidir no painel. Uma vez que o coletor inclinado só receber radiação solar direta momentos mais tarde, os cálculos foram efetuados através da Eq. (9).

Mediante os cálculos efetuados, e considerando a divisão entre equinócios em Verão e Inverno, verifica-se que durante o Inverno, ou seja, entre 22 de setembro e 20 de março $\omega_s/^{\circ} < \omega'_s/^{\circ}$ e no período de Verão, $\omega_s/^{\circ} > \omega'_s/^{\circ}$, confirmando a literatura consultada.

5.1 RESULTADOS PARA AVEIRO

Para a cidade de Aveiro, foram efetuados cálculos comparativos de acordo com os cenários considerados nas Tabelas 5, 6 e 7. O facto de se considerarem painéis ajustáveis

sazonalmente, pode significar um aumento no rendimento do painel de até 5 % de acordo com diversos estudos efetuados para diferentes cidades. Por outro lado, é conveniente um painel fixo, pois não são necessários ajustes ao longo do ano, mesmo que tal represente um rendimento médio anual inferior.

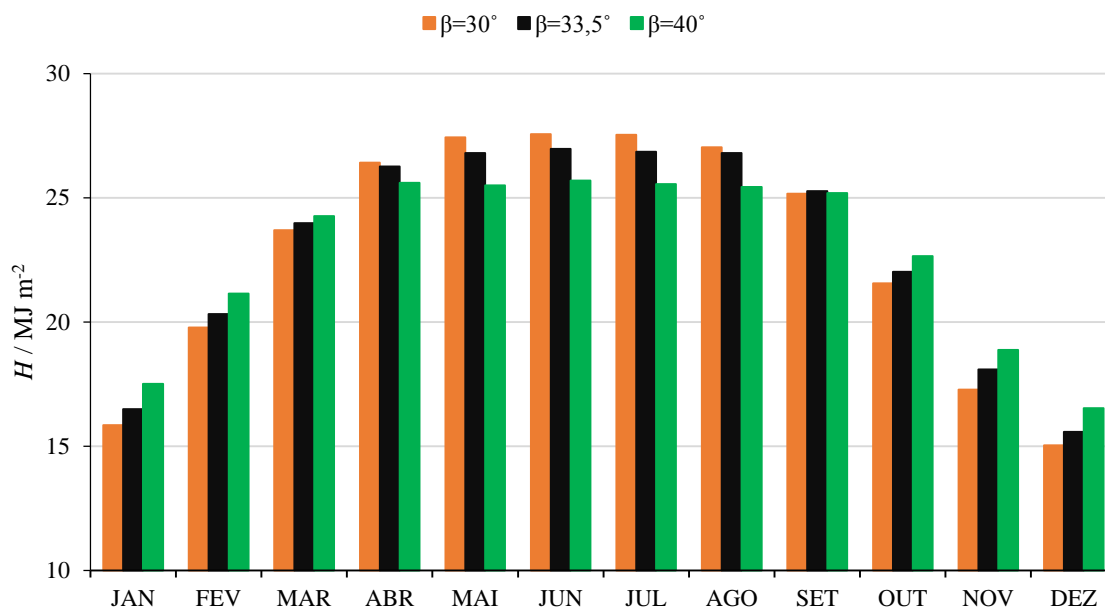


Figura 14 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, em Aveiro

No gráfico da Figura 14 é apresentada a média mensal para o painel fixo nas três inclinações consideradas na Tabela 5. Observa-se que nos meses de abril a agosto, o painel fixo com inclinação inferior ($\beta/^\circ = 30$) apresenta valores superiores de radiação incidente, quando comparado com as duas outras opções, o que corresponde a uma média de 27,2 MJ m⁻², ocorrendo o valor mínimo de 15,0 MJ m⁻² no mês de dezembro. Nos restantes meses, o painel com $\beta/^\circ = \phi/^\circ$ é a melhor opção a considerar, ou seja, nos meses de Inverno uma inclinação superior garante uma melhoria na incidência da radiação captada, com média de 20,9 MJ m⁻². No entanto, caso o objetivo seja uma uniformização anual da radiação incidente, é através da inclinação de $\beta/^\circ = 33,5$ que tal é possível, com valores de radiação anual de 23,0 MJ m⁻².

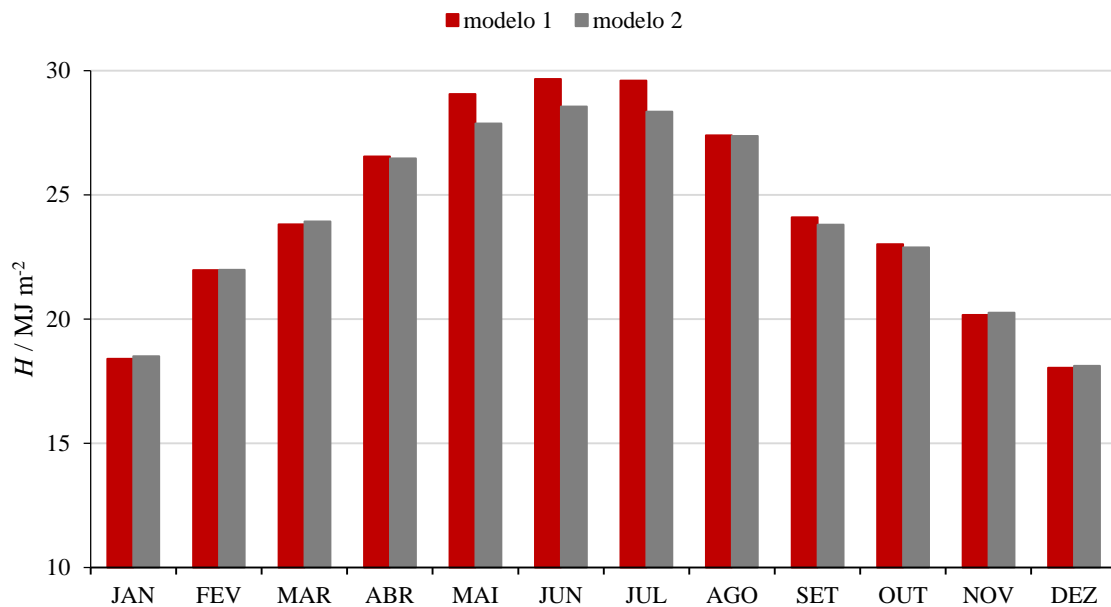


Figura 15 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Aveiro

A Figura 15 representa a média mensal diária para o painel ajustável duas vezes ao ano. É possível verificar, com recurso ao Anexo A, que os dois modelos apresentam valores médios anuais muito semelhantes, de $24,3 \text{ MJ m}^{-2}$ (modelo 1) e $24,0 \text{ MJ m}^{-2}$ (odelo 2). Comparando os dois gráficos (*vide* Figuras 14 e 15), é possível verificar que nos meses de Inverno (de setembro a março), o painel ajustável com inclinação de $\beta/^{\circ} = 55$ é aquele que apresenta valores de radiação incidente superior, confirmando mais uma vez que quanto maior a inclinação no Inverno, melhores resultados se observam.

De modo geral, o painel ajustável apresenta-se como a melhor opção, especialmente nos meses de Verão, atingindo uma média mensal de $29,7 \text{ MJ m}^{-2}$ durante o mês de junho no modelo 1. Através do anexo A, é possível observar que, para todas as inclinações, o mês de junho é aquele onde se observam maiores valores de radiação incidente e o mês de dezembro aquele em que se registam os menores valores.

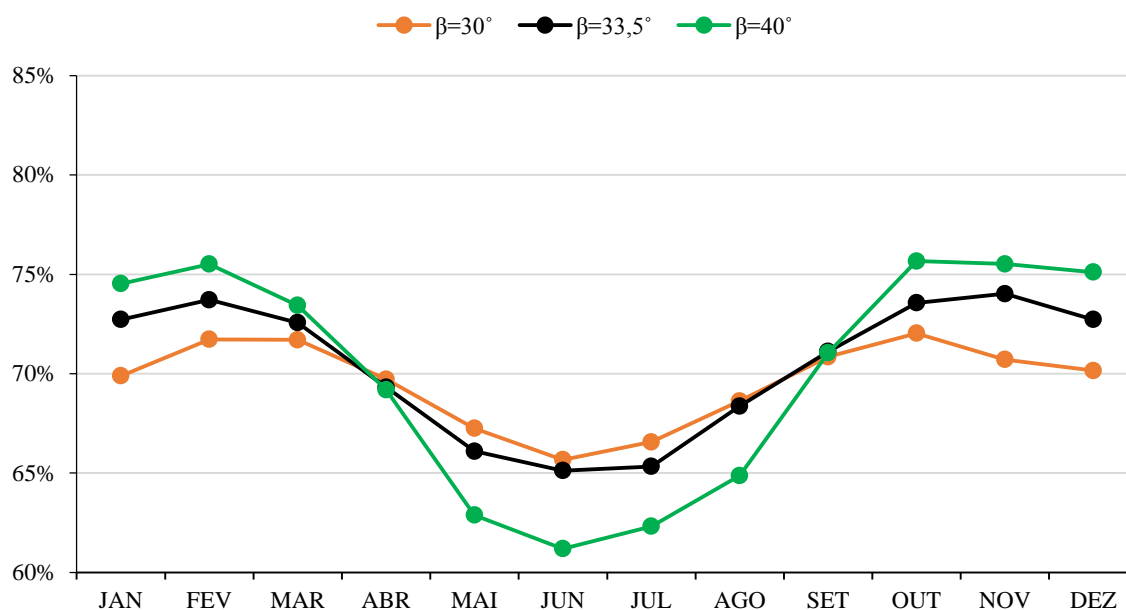


Figura 16 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, em Aveiro

Na Figura 16, é possível observar o rendimento atingido com as diferentes inclinações do painel fixo. Os valores aqui apresentados foram conseguidos através da comparação com o painel móvel que rastreia continuamente o Sol. Observa-se que, para ambos, o rendimento é superior nos meses de Inverno e inferior no Verão. Com recurso ao Anexo B, verifica-se que ocorre um mínimo, no mês de junho, nas três opções, (65,7 % para $\beta/^\circ = 30$, 65,1 % para $\beta/^\circ = 33,5$ e 61,2 % para $\beta/^\circ = 40$). Há um decréscimo acentuada no rendimento dos painéis a partir do mês de fevereiro e que se mantém até setembro.

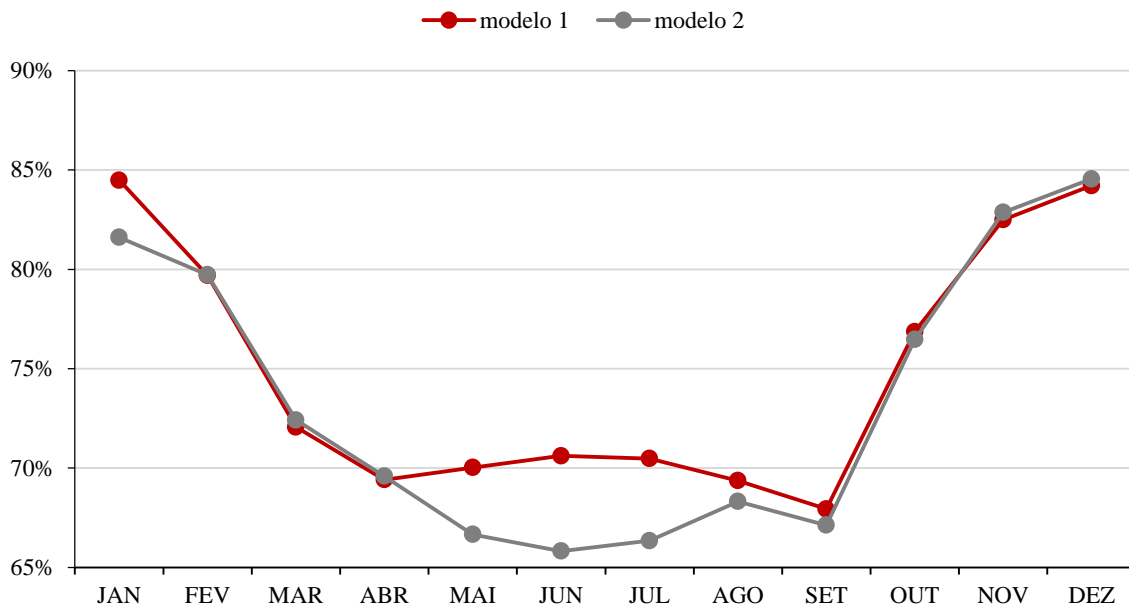


Figura 17 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2x/ano para as diferentes inclinações, em Aveiro

O gráfico da Figura 17 representa o rendimento (em %) do painel ajustável duas vezes ao ano. Tal como observado na Fig. anterior (*vide* Fig. 16), os meses de Verão (entre março e setembro) apresentam rendimento inferior. Observa-se um decréscimo acentuado antes do ajuste de Verão (março), e um aumento acentuado após o ajuste de Inverno (setembro). O mês de dezembro é aquele que apresenta valores mais baixos de radiação incidente, o que se traduz num maior rendimento. Comparativamente com o rendimento dos painéis fixos, os painéis ajustáveis apresentam um mínimo: de 67,9 % para o modelo 1, no mês de setembro, e de 65,8 % para o modelo 2.

5.2 RESULTADOS PARA PONTA DELGADA

Do mesmo modo que foi efetuado para Aveiro, serão agora apresentados os dados referentes a Ponta Delgada. As diferenças de latitude terão influência na inclinação do painel, visto que neste caso os painéis fixos apresentam inclinações de $\beta/^{\circ} = 28$, $\beta/^{\circ} = 31,98$ e $\beta/^{\circ} = 38$. O ajuste do painel foi efetuado nos dias 30 de março, para a inclinação de Verão e 12 de setembro para a de Inverno.

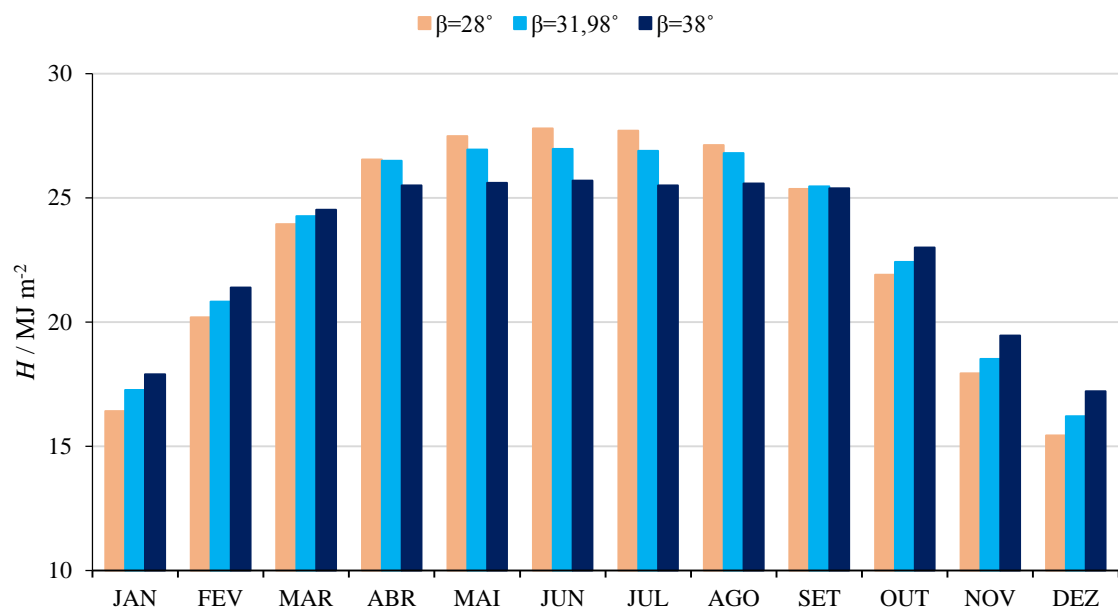


Figura 18 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada

O gráfico da Figura 18 é representativo da média mensal observada em Ponta Delgada, para as diferentes inclinações do painel fixo. Tendo em consideração que a latitude é de 38° , é normal que não se verifiquem alterações significativas quando se comparam os valores com Aveiro. Ocorre um mínimo no mês de dezembro para as três inclinações. No mês de junho, é observada a média mais alta de radiação incidente ($27,8 \text{ MJ m}^{-2}$) para a inclinação mais baixa considerada.

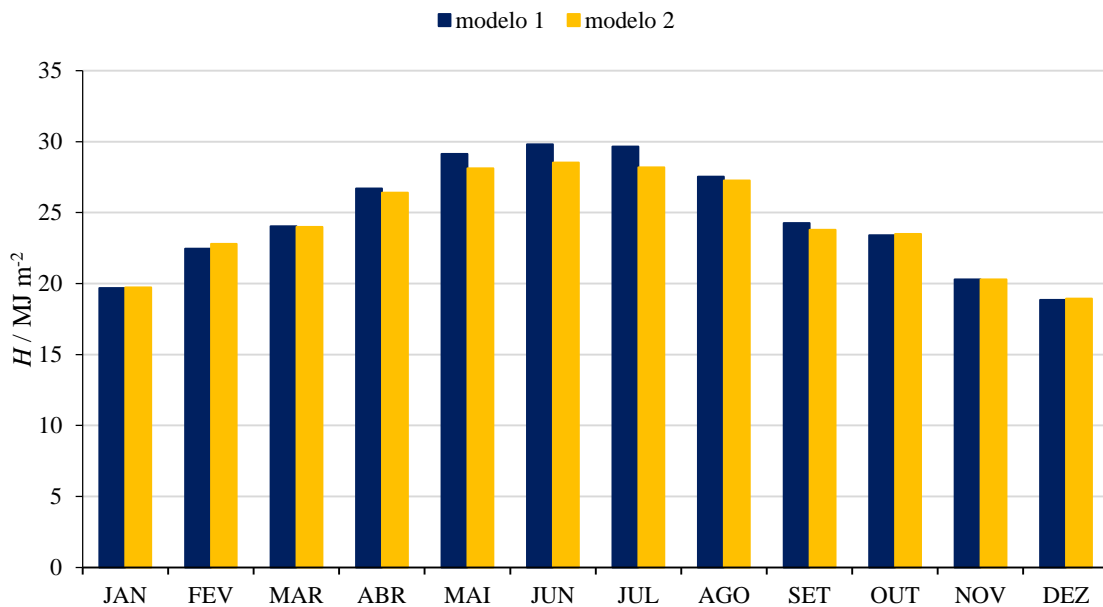


Figura 19 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada

De novo é possível observar que o ajuste dos painéis é, de um modo geral, a melhor opção a considerar, caso se opte por painéis fixos. Nos meses de março e setembro verifica-se que os painéis ajustáveis 2×/ano apresentam uma ligeira descida no valor de radiação incidente, sendo que em setembro apresentam uma média de $24,0 MJ m^{-2}$, o que se traduz em cerca de $1,0 MJ m^{-2}$ inferior aos painéis fixos todo o ano. O mês de junho apresenta-se como o mês em que se consegue o valor mais elevado de radiação incidente nos painéis ajustáveis, de $29,8 MJ m^{-2}$ no modelo 1 e $28,5 MJ m^{-2}$ no modelo 2 e, o mês de dezembro, é aquele em que os valores são mais baixos, sendo que no modelo 1 a média é de $18,9 MJ m^{-2}$ e de $19,0 MJ m^{-2}$ no modelo 2. Mesmo assim, comparando com Aveiro existe um acréscimo de radiação incidente, tanto nas inclinações do painel fixo todo o ano como nos ajustáveis 2×/ano.

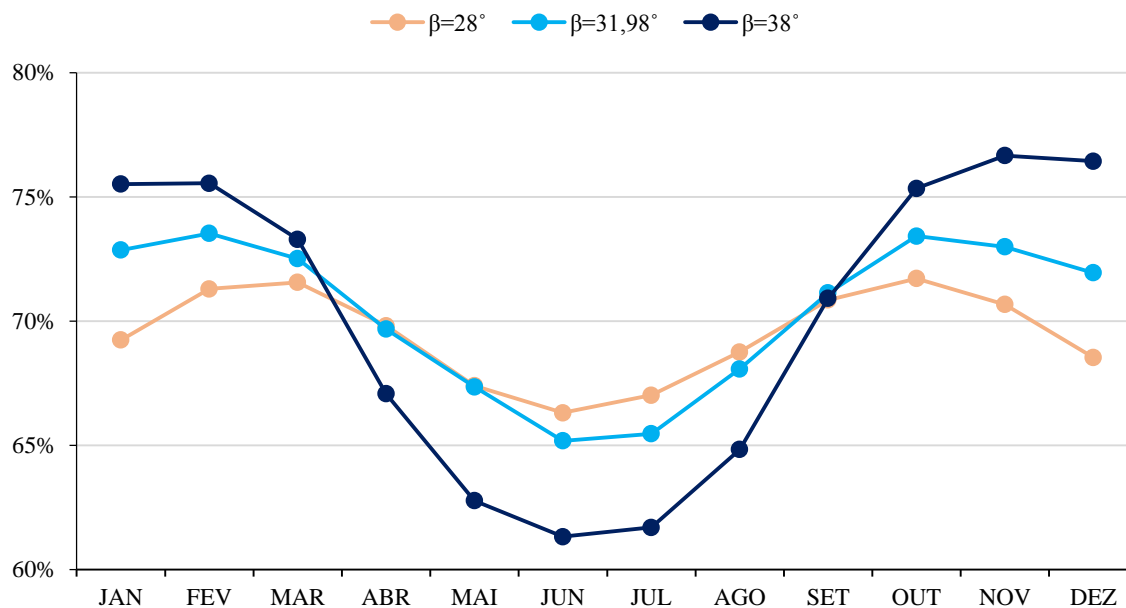


Figura 20 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada

Na Figura 20 é possível observar o rendimento conseguido com as três inclinações do painel fixo. Verifica-se que ao alterar a inclinação para $\beta/^\circ = 38$, existe um aumento do rendimento nos meses de Inverno (entre setembro e março), superior a 75,0 %. A diminuição verificada no Verão deve-se ao facto de, nesses meses, o valor da radiação incidente ser superior. Verifica-se um mínimo (61,3 %) no mês de junho e um máximo de 76,7 % no mês de novembro para o painel fixo com inclinação de $\beta/^\circ = 38$. O comportamento das três curvas é idêntico, destacando-se que a inclinação inferior $\beta/^\circ = 28$ apresenta melhor rendimento nos meses de abril a agosto e pior nos meses de setembro a março.

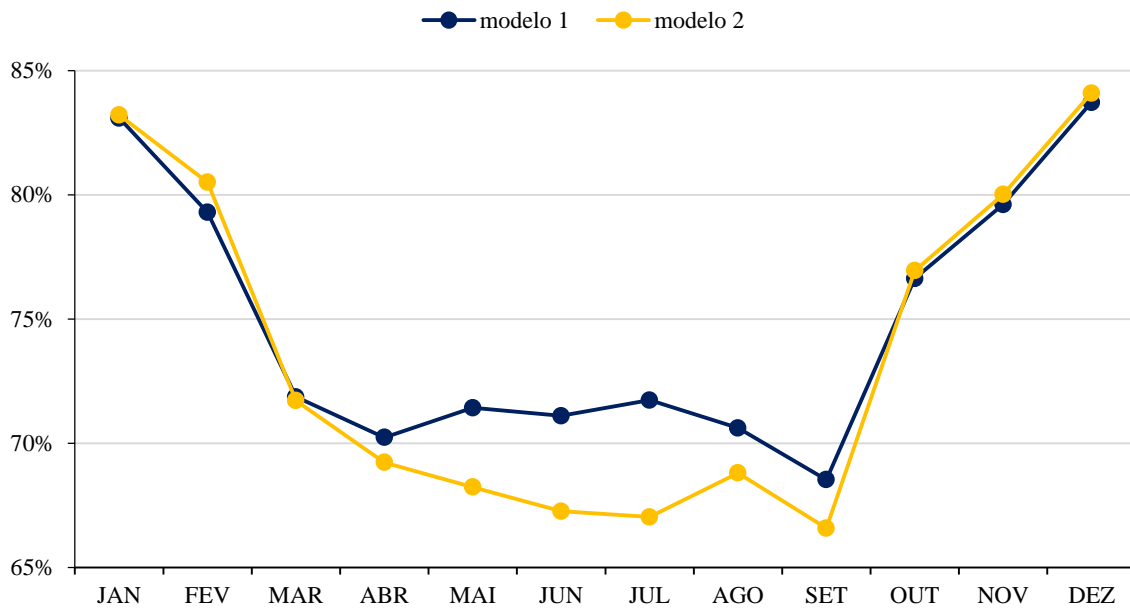


Figura 21 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2×/ano para as diferentes inclinações, em Ponta Delgada

Na Figura 21, é possível observar o rendimento dos painéis ajustáveis ao longo do ano, ou seja, entre os dias 13 de setembro e 29 de março o ajuste de Inverno confere ao painel do modelo 1 a inclinação de $\beta/^{\circ} = 52,5$ e de $\beta/^{\circ} = 53$ para o modelo 2. Entre os dias 30 de março e 12 de setembro, o painel adquire uma inclinação mais horizontal para os modelos 1 e 2, de $\beta/^{\circ} = 14,3$ e $\beta/^{\circ} = 23$, respetivamente. Neste caso verifica-se um mínimo para o modelo 1, de 68,5 % no mês de setembro, ou seja, logo após o ajuste de Inverno. Apura-se um máximo, para o mesmo painel, de 83,7 % no mês de dezembro. Para o modelo 2, o valor mínimo ocorre no mesmo mês (setembro), com o valor de 66,6 %. Pela análise do Anexo D, é possível concluir que o rendimento global dos dois painéis difere 1,2 %, tornando-se viável qualquer uma das duas opções.

5.3 RESULTADOS PARA O FUNCHAL

Para o Funchal foi utilizada a mesma metodologia que nas cidades de Aveiro e Ponta Delgada, alterando apenas a latitude do local ($\phi/^{\circ} = 32$), sendo esta a latitude mais baixa considerada nos cálculos.

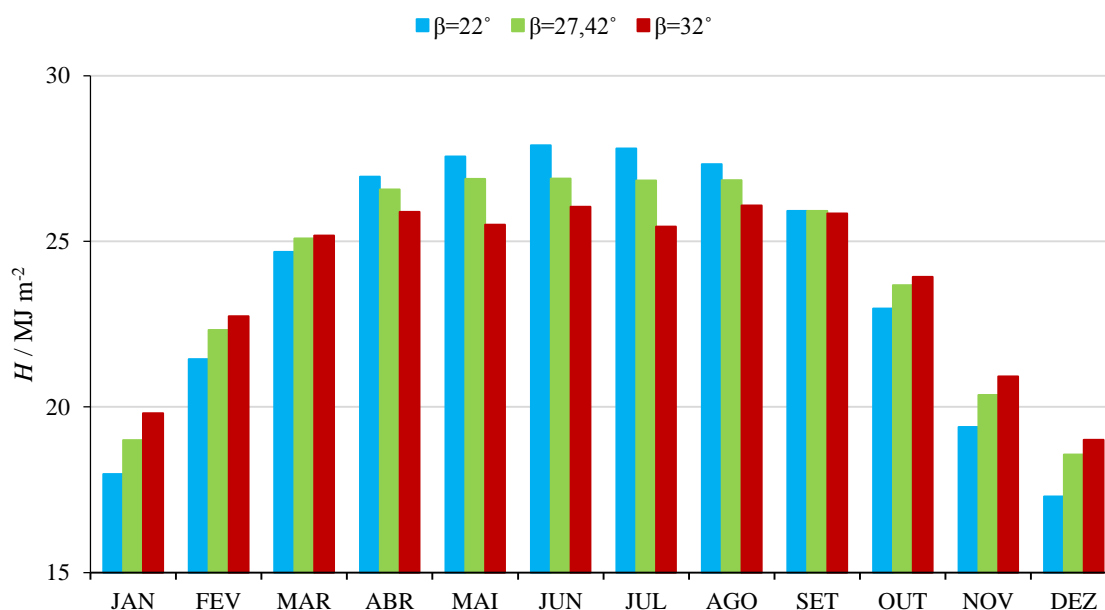


Figura 22 - Média mensal da radiação diária incidente no painel fixo para as diferentes inclinações, no Funchal

O gráfico da Figura 22 mostra a média diária do painel fixo no Funchal. O painel fixo, com a inclinação de $\beta/^{\circ} = 22$ apresenta o valor mais alto de radiação incidente no mês de junho ($27,9 \text{ MJ m}^{-2}$) e o valor mais baixo é observado, para a mesma inclinação do painel, no mês de dezembro ($17,3 \text{ MJ m}^{-2}$). Entre maio e agosto, este painel apresenta uma média de $27,6 \text{ MJ m}^{-2}$, sendo superior ao painel com inclinação de $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ}$ em $1,9 \text{ MJ m}^{-2}$. A média anual, em termos de radiação incidente é de $23,9 \text{ MJ m}^{-2}$ para as inclinações de $\beta/^{\circ} = 22$ e $\beta/^{\circ} = 32$ e de $24,1 \text{ MJ m}^{-2}$ para a inclinação de $\beta/^{\circ} = 27,42$.

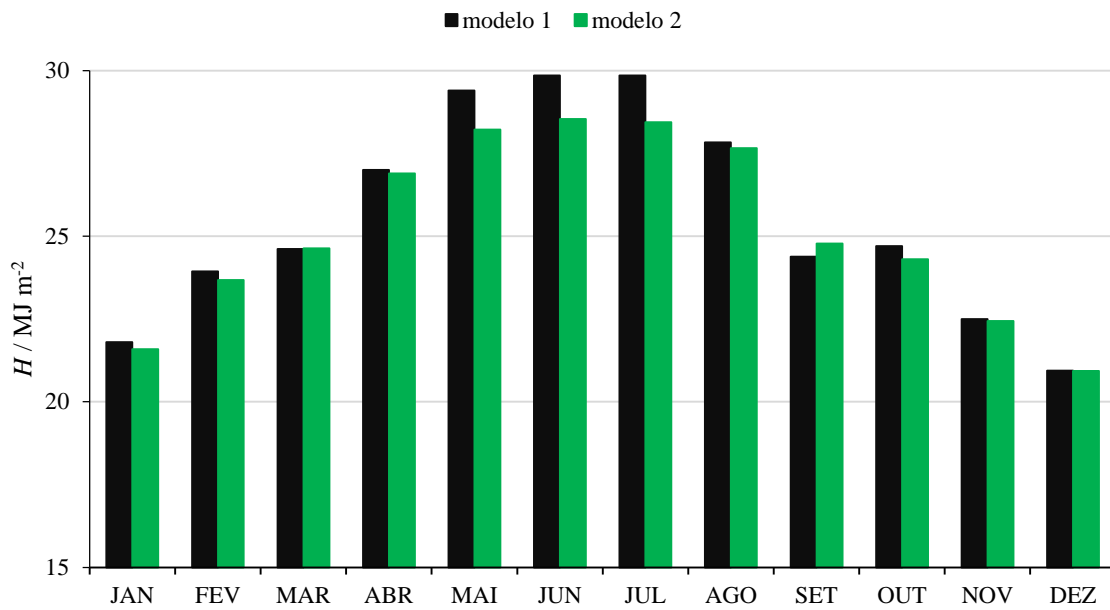


Figura 23 - Média mensal da radiação diária incidente no painel ajustável 2 \times /ano para as diferentes inclinações, no Funchal

A Figura 23 mostra a média mensal da radiação diária incidente, H (em MJ m^{-2}), no Funchal, quando se procede ao ajuste 2 \times /ano. Constata-se de novo o ganho conseguido caso se opte por este tipo de ajuste, representando um incremento de cerca de $1,5 \text{ MJ m}^{-2}$ ao longo do ano, quando comparado com a média do painel fixo. Nos dois modelos, observa-se um máximo no mês de junho, de $29,9 \text{ MJ m}^{-2}$, no modelo 1 e de $28,5 \text{ MJ m}^{-2}$, no modelo 2. O mínimo ocorre no mês de dezembro, e apresenta o mesmo valor nos dois modelos ($20,9 \text{ MJ m}^{-2}$). Pela análise do Anexo E, é possível confirmar que de modo geral, o painel ajustável representa melhores valores de radiação incidente, especialmente o modelo 1.

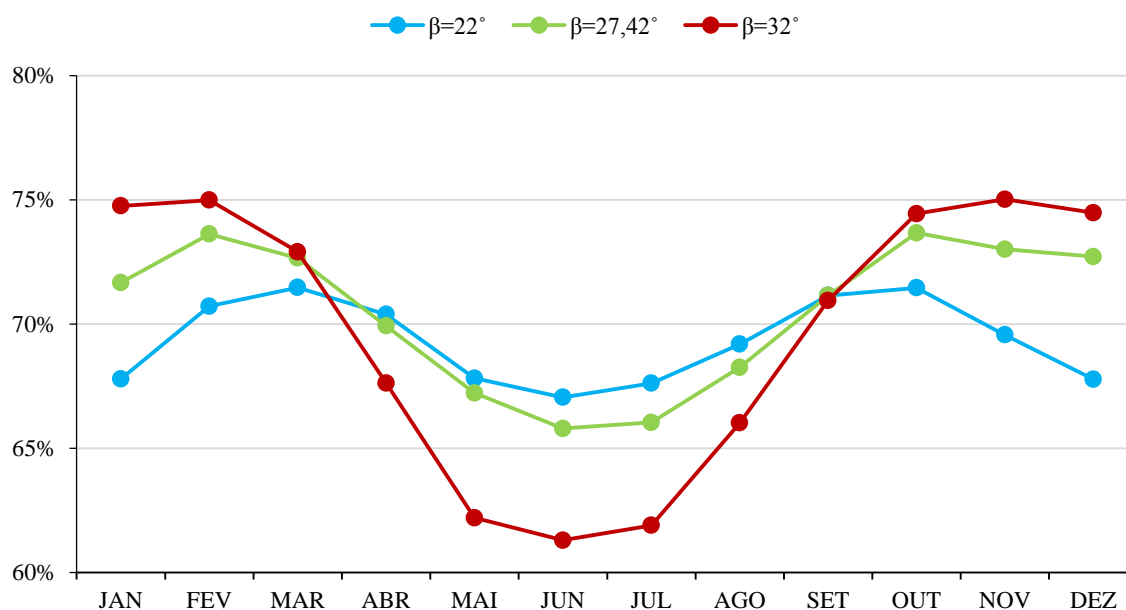


Figura 24 - Rendimento, η (em %) do painel fixo para as diferentes inclinações, no Funchal

O rendimento geométrico dos painéis é conseguido através da razão entre a radiação incidente no painel fixo ou ajustável e o móvel. Ao comparar a Figura 24 com o gráfico da Figura 22 é possível verificar que são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior é o valor da radiação incidente, menor será o rendimento do painel. Deste modo verificamos que o painel com inclinação de $\beta/^\circ = 32$ apresenta dois máximos absolutos nos meses de fevereiro e novembro, e um mínimo no mês de junho. O modelo 1, do painel ajustável 2 \times /ano (*vide* Fig. 25), apresenta um mínimo em setembro e um máximo em dezembro, como pode ser comprovado pelo Anexo E. No modelo 2, o mínimo ocorre também no mês de setembro, como observado em Aveiro e Ponta Delgada, e o máximo, no mês de janeiro (82,2 %). Mais uma vez se verifica que, optando pelo ajuste dos ângulos, é possível um aumento significativo no rendimento dos painéis, especialmente no Inverno onde se atingem rendimentos superiores a 80 %. Esse valor diminui para cerca de 70 % nos meses de Verão (de abril a setembro).

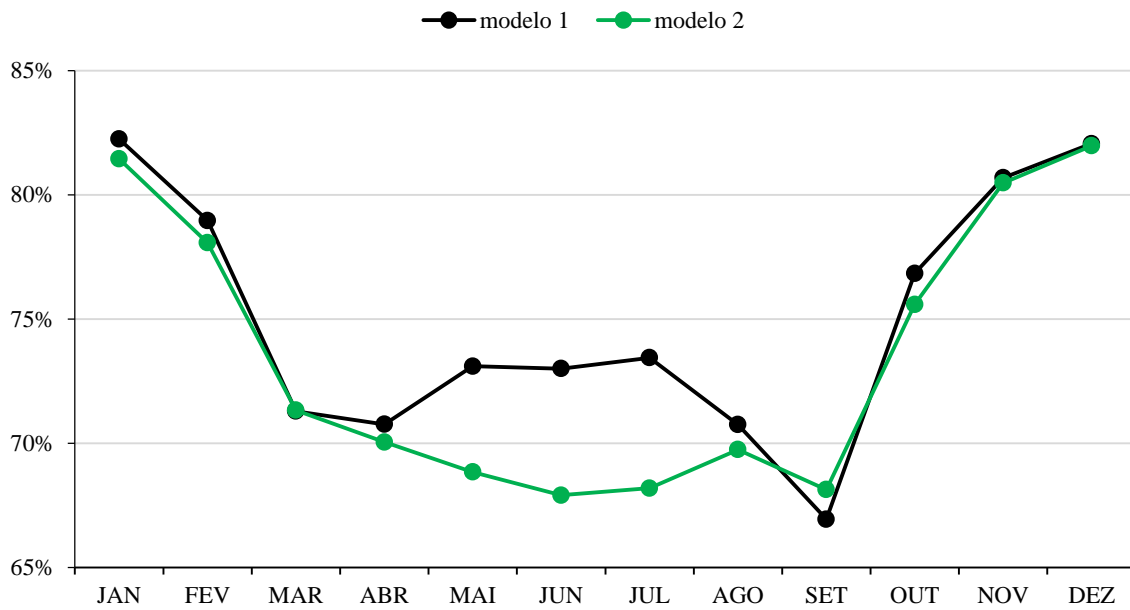


Figura 25 - Rendimento, η (em %) do painel ajustável 2x/ano para as diferentes inclinações, no Funchal

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta subsecção serão apresentados os valores alcançados através das comparações efetuadas nos pontos anteriores. Será efetuada a comparação global dos rendimentos nas três cidades consideradas, rendimentos esses que foram obtidos quando comparados os valores da radiação solar incidente nos painéis com os diferentes tipos de inclinação, com os valores conseguidos para o painel de referência, ou seja, o painel móvel. De referir também que os valores foram calculados para o dia médio de cada mês, sendo este representativo da média mensal, H (em MJ m^{-2}), neste estudo.

Tabela 8 - Inclinação conferida ao painel fixo, nas três cidades

Cidade	Inclinação		
	$\beta / ^\circ = \phi / ^\circ - 10$	$\beta / ^\circ = 0,76 \phi / ^\circ + 3,1$	$\beta / ^\circ = \phi / ^\circ$
Aveiro	30	33,5	40
Ponta Delgada	28	31,98	38
Funchal	22	27,4	32

Na Tabela 8 estão representadas as três inclinações consideradas para o painel fixo, em cada uma das cidades. Aveiro, pela sua latitude apresenta inclinações superiores.

Tabela 9 - Média anual, (em MJ m⁻²) para o painel fixo, nas três cidades

Cidade	Inclinação		
	$\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} - 10$	$\beta/^{\circ} = 0,76 \phi/^{\circ} + 3,1$	$\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ}$
Aveiro	22,9	23,0	22,8
Ponta Delgada	23,2	23,3	23,1
Funchal	23,9	24,1	23,9

A Tabela 9 apresenta a média anual, (em MJ m⁻²) nas três cidades, para os três modelos considerados para o painel fixo. Observa-se que, nas três cidades, é a inclinação de $\beta/^{\circ} = 0,76 \phi/^{\circ} + 3,1$ que permite que se obtenha uma média anual superior. É possível também verificar que Aveiro, apresenta os valores mais baixos e, o Funchal, os valores mais elevados.

Tabela 10 - Inclinação conferida ao painel ajustável 2×/ano, nas três cidades

Cidade	Modelo 1		Modelo 2	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno
	$\beta/^{\circ} = 0,93 \phi/^{\circ} - 21$	$\beta/^{\circ} = 0,875 \phi/^{\circ} + 19,2$	$\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} - 15$	$\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} + 15$
Aveiro	16,2	54,2	25	55
Ponta Delgada	14,3	52,5	23	53
Funchal	8,8	47,2	17	47

Na Tabela 10 é possível conferir as inclinações que o painel ajustável 2×/ano adquire com os ajustes de Verão e de Inverno. No Verão, no Funchal, o painel ajustável adquire uma posição quase horizontal, o que aumenta a quantidade de radiação incidente, como pode ser observado na tabela seguinte (*vide* Tabela 11).

Tabela 11 - Inclinação conferida ao painel ajustável 4×/ano, nas três cidades

Cidade	Estação do ano		
	Verão	Primavera/Outono	Inverno
	$\beta/^{\circ} = 0,92 \phi/^{\circ} - 24,3$	$\beta/^{\circ} = 0,98 \phi/^{\circ} - 2,3$	$\beta/^{\circ} = 0,89 \phi/^{\circ} + 24$
Aveiro	12,5	36,9	59,6
Ponta Delgada	10,7	34,9	57,2
Funchal	5,1	29,1	52,5

A Tabela 11 apresenta a inclinação do painel quando se procede ao ajuste nas quatro estações do ano. Segundo o autor [37], no Verão o painel adquire uma inclinação quase horizontal, no Inverno mais vertical e, na Primavera e no Outono a inclinação é intermédia e igual nas duas estações.

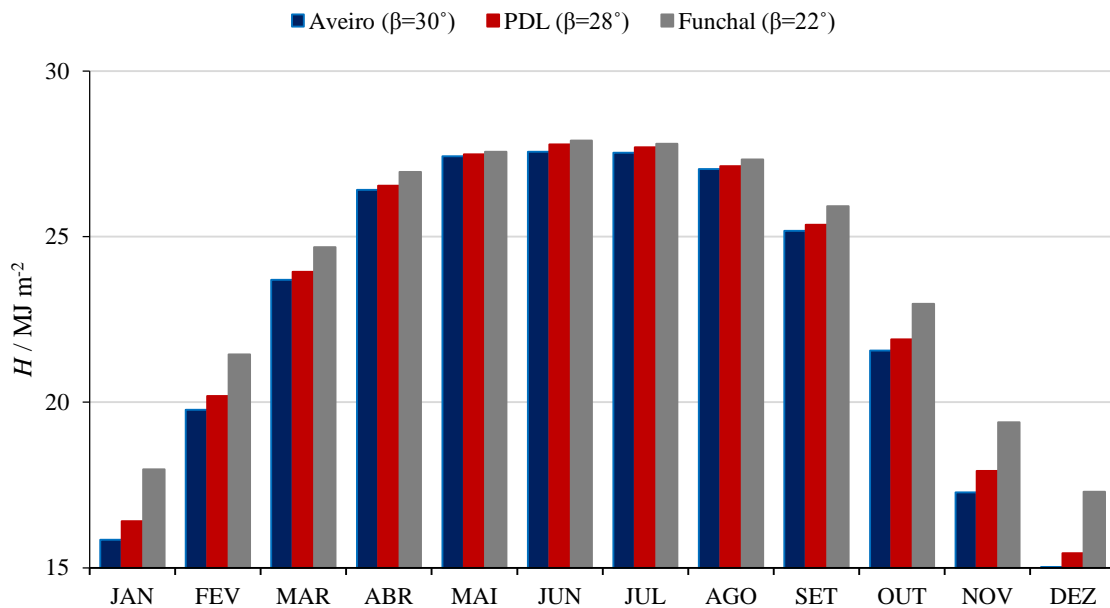


Figura 26 - Média mensal do painel fixo, para a inclinação de $\beta/^{\circ} = \phi/^{\circ} - 10$

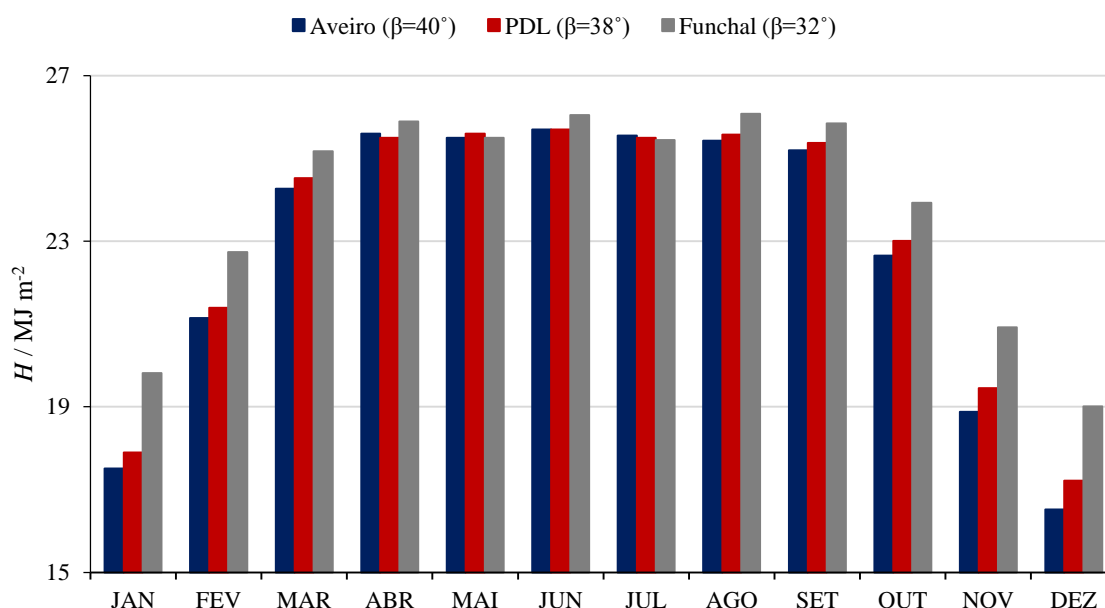


Figura 27 - Média mensal do painel fixo, para a inclinação de $\beta/^\circ = \phi/^\circ$

No gráfico da Figura 26 é possível observar a média mensal H , (em MJ m^{-2}) da radiação solar incidente no painel fixo nas três cidades. Ao utilizar esta inclinação, a média anual é de $22,9 \text{ MJ m}^{-2}$ em Aveiro, $23,2 \text{ MJ m}^{-2}$ em Ponta Delgada e $23,9 \text{ MJ m}^{-2}$ no Funchal. Pela análise do gráfico, verifica-se que a cidade do Funchal apresenta, ao longo do ano, valores mais elevados que os observados nas outras duas cidades.

Na Figura 27 está representada a comparação conseguida nas três cidades quando $\beta/^\circ = \phi/^\circ$. Com esta inclinação, observa-se um aumento da radiação incidente nos meses de Inverno. No Verão verifica-se o contrário, ou seja, inclinações mais altas (*vide* Figura 27), traduzem-se em valores mais baixos de radiação mensal incidente no coletor. Nos dois gráficos apresentados, é no Funchal que a média mensal é superior durante todos os meses do ano.

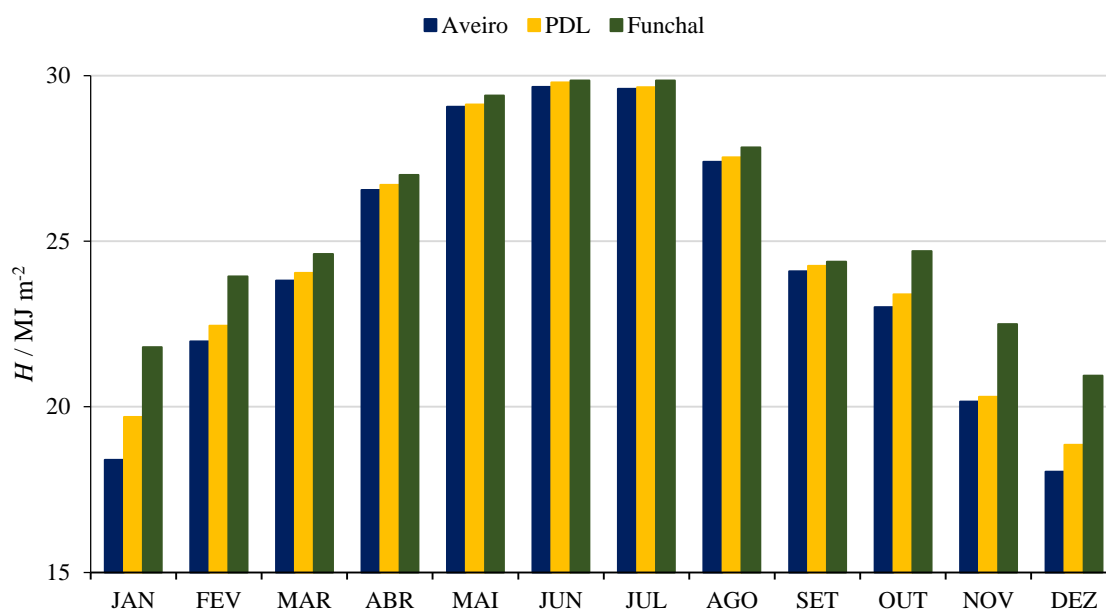


Figura 28 - Média mensal do painel ajustável 2×/ano, para o modelo 1

A Figura 28 mostra a média mensal H , (em MJ m^{-2}) do painel ajustável 2×/ano, para o modelo 1. Verifica-se que a cidade do Funchal é aquela que apresenta os valores mais elevados de radiação incidente, especialmente entre março e setembro. Com este ajuste são conseguidos valores médios anuais de $24,3 \text{ MJ m}^{-2}$ para Aveiro, $24,7 \text{ MJ m}^{-2}$ para Ponta Delgada e $25,6 \text{ MJ m}^{-2}$ no Funchal.

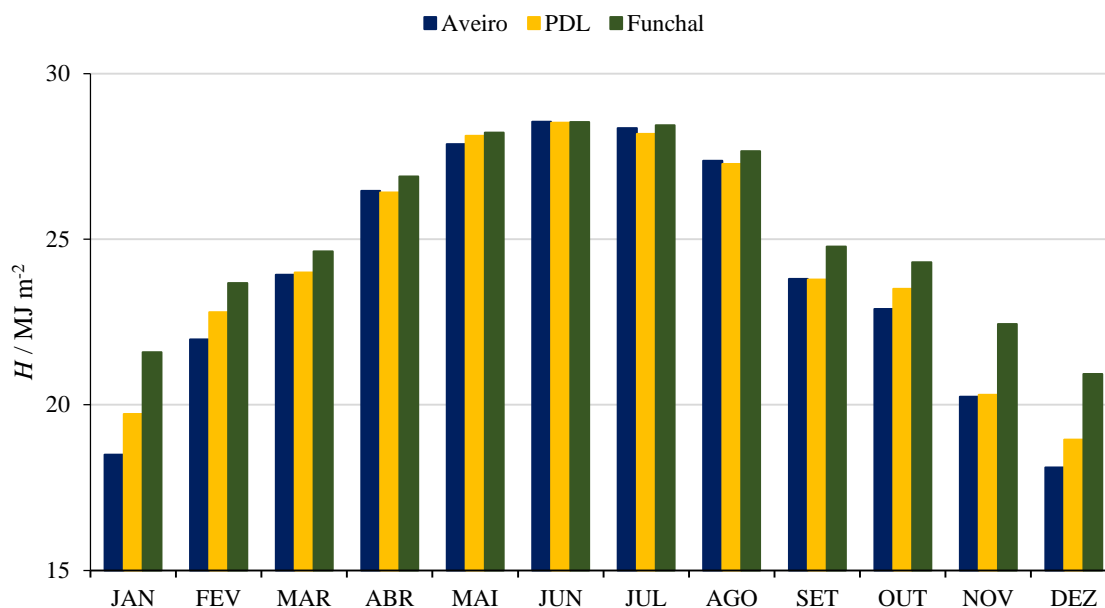


Figura 29 - Média mensal do painel ajustável 2×/ano, para o modelo 2

Na Figura 29 é possível observar a média mensal utilizando o modelo 2. O Funchal é novamente a cidade que apresenta melhores resultados e, o mês de junho é aquele em que se consegue uma média mensal superior, atingindo cerca de $28,6 \text{ MJ m}^{-2}$ nas três cidades. Verifica-se também nos dois gráficos (*vide* Figuras 28 e 29), que no mês de maio, existe um aumento considerável. No mês de setembro verifica-se o oposto, ou seja, após o ajuste para a inclinação de Inverno, existe um decréscimo na radiação incidente. O valor mais baixo ($18,0 \text{ MJ m}^{-2}$) é verificado no mês de dezembro, em Aveiro, para o modelo 1.

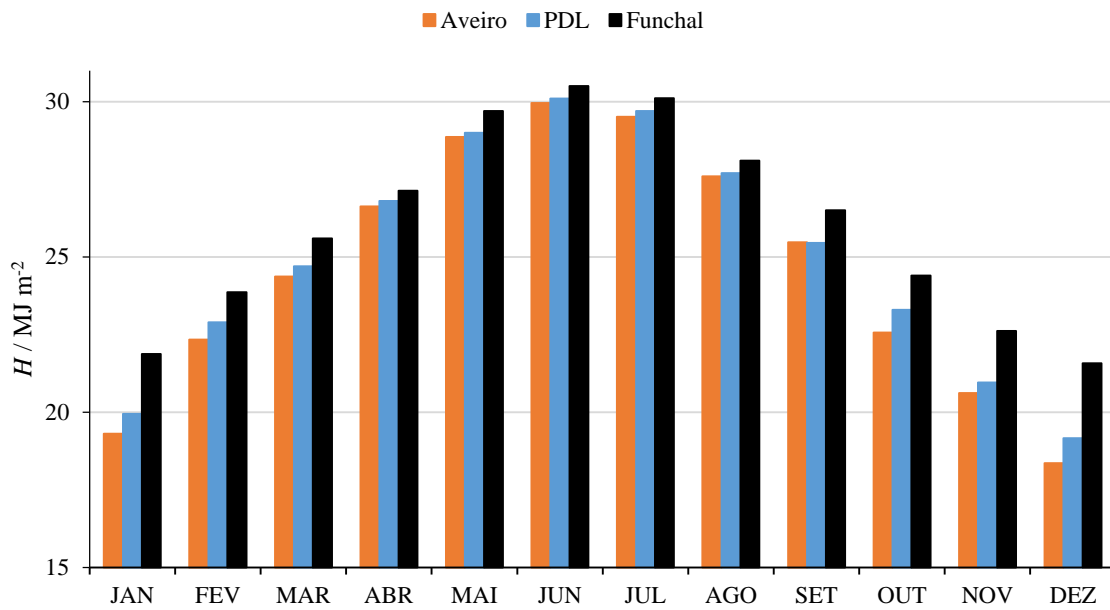


Figura 30 - Média mensal do painel ajustável 4×/ano, nas três cidades

No gráfico da Figura 30 observa-se a média mensal quando o ajuste é efetuado 4×/ano. Este ajuste é ideal quando se pretende obter mais energia durante os meses de Verão, não descurando os meses de Inverno, em que se verifica um incremento significativo em relação às opções consideradas anteriormente. No mês de junho, no Funchal a radiação incidente é de $30,5 \text{ MJ m}^{-2}$ sendo este o valor mais alto observado. No mês de dezembro, a radiação varia entre os $18,4 \text{ MJ m}^{-2}$ em Aveiro e $21,6 \text{ MJ m}^{-2}$ no Funchal. Em termos anuais, Aveiro apresenta uma média de $24,6 \text{ MJ m}^{-2}$, Ponta Delgada de $25,0 \text{ MJ m}^{-2}$ e o Funchal apresenta-se como a cidade onde a média é mais elevada, observando-se $26,0 \text{ MJ m}^{-2}$ de radiação solar incidente.

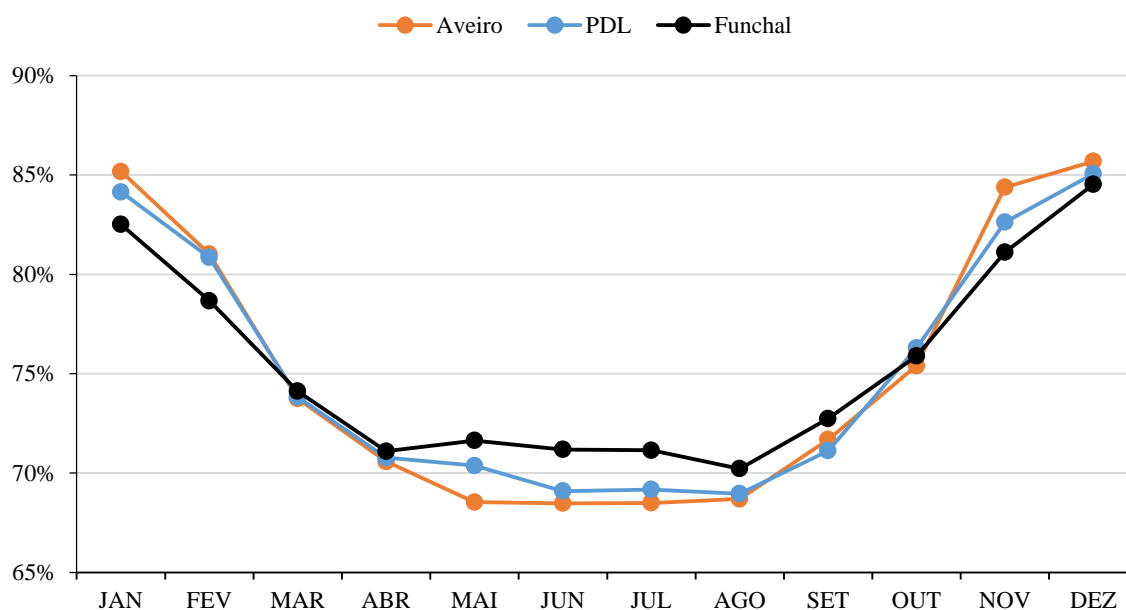


Figura 31 - Rendimento, η (em %), do painel ajustável 4x/ano nas três cidades

Como efetuado anteriormente, foi também calculado o rendimento do painel, quando este é ajustado de acordo com as estações do ano (*vide* Figura 31). Observam-se a ocorrência de um máximo no mês de dezembro, de 85,7 % em Aveiro, 85,1 % em Ponta Delgada e 84,5 % no Funchal. Ocorre um mínimo (de 68,5 %) no mês de julho, em Aveiro, e de 69,0 % e 70,2 % no mês de agosto em Ponta Delgada e Funchal respetivamente. Comparando o gráfico da Figura 31 com os valores apresentados anteriormente, é possível verificar o acréscimo ocorrido nos meses de setembro a março, com destaque para dezembro e janeiro, como pode ser comprovado através dos Anexos B, D e F.

De seguida, serão apresentados os rendimentos geométricos obtidos para cada uma das cidades. Cada opção é comparada com o painel móvel, que é considerado aquele que apresenta rendimento ótimo (cerca de 100 %).

Tabela 12 - Rendimento, η (em %), dos ajustes efetuados

Cidade	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^\circ = \phi/^\circ - 10$	$\beta/^\circ = 0,76 \phi/^\circ + 3,1$	$\beta/^\circ = \phi/^\circ$	Modelo 1	Modelo 2	
Aveiro	69,6	70,4	70,1	74,8	73,5	75,2
PDL	69,4	70,4	70,1	74,8	73,6	75,2
Funchal	69,3	70,5	69,7	75,0	73,5	75,4

A Tabela 12 mostra o rendimento conseguido através do ajuste do ângulo do painel, para as latitudes de 40° , 38° e 32° . Ao comparar os melhores resultados obtidos, ou seja, o painel fixo com inclinação de $\beta/^\circ = 0,76\phi/^\circ + 3,1$, com o modelo 1, para o painel ajustável duas vezes ao ano, observa-se um aumento do rendimento geométrico de cerca de 4,5 % (absoluto). Quando a comparação é efetuada entre a mesma inclinação do painel fixo, e o painel ajustável quatro vezes ao ano, verifica-se um incremento médio (absoluto) de cerca de 4,9 %.

No Inverno, ou seja, entre os meses de novembro a fevereiro, quando se opta por um painel ajustável, que tem a sua inclinação alterada para o ajuste de Inverno, é possível obter rendimentos entre 80 % e 84 %. Quando o painel é fixo todo o ano, nos meses de maio a agosto verifica-se uma diminuição do rendimento, para cerca de 65 % (média geral). Esta diminuição vem confirmar o que já foi dito anteriormente, ou seja, no Verão o Sol atravessa uma grande área no céu o que se traduz numa diminuição da energia captada pelo painel fixo. Por outro lado, é nesta época que o ajuste quatro vezes ao ano apresenta os valores mais elevados, atingindo no Funchal, os $30,5 \text{ MJ m}^{-2}$.

Tabela 13 - Média anual, (em MJ m^{-2}) para o painel ajustável 2 e 4 vezes/ano, nas três cidades

Cidade	Ajuste 2×/ano		Ajuste 4×/ano
	Modelo 1	Modelo 2	
Aveiro	24,3	24,0	24,6
Ponta Delgada	24,7	24,3	25,0
Funchal	25,6	25,2	26,0

Na Tabela 13 é possível verificar a média anual para os painéis ajustáveis duas e quatro vezes/ano. Verifica-se, à semelhança do que é apresentado na Tab. 9, que o Funchal apresenta os melhores resultados anuais. Relativamente aos dois modelos considerados

para o ajuste 2×/ano, é o modelo 1 aquele onde se verificam valores mais elevados de radiação incidente ao longo do ano. O ajuste 4×/ano permite um aumento entre 0,3 a 0,6 MJ m⁻².

5.5 COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS EFETUADOS

A elaboração deste estudo teve por base o trabalho experimental efetuado por Charles R. Laudau, ‘*Optimum Tilt of Solar Panels*’ [37]. As restantes inclinações consideradas e, apesar de recomendadas pelos autores (J. A. Duffie and W. A. Beckman [5], H. Heywood [40] e C. L. Cheng, C. S. Sanchez Jimenez, and M. C. Lee [43]), não apresentam os resultados obtidos aquando da utilização dessas inclinações, daí o foco principal ser o estudo efetuado por Charles R. Laudau [37].

Na Tabela 14 estão representados os resultados conseguidos, para uma latitude de 40°, de acordo com as fórmulas apresentadas no estudo de Charles R. Laudau [37]. Estes valores são comparados com a energia recebida caso o painel se mantenha sempre direcionado para o Sol, ou seja, com um rendimento ótimo de 100 % [37].

Tabela 14 - Rendimento η , (em %), para a latitude de 40° [37]

Painel	Fixo	Ajustável 2×/ano	Ajustável 4×/ano	Móvel de 2 eixos
Valor ótimo	71,1	75,2	75,7	100,0

Ao comparar os resultados obtidos com os resultados apresentados no estudo citado anteriormente [37], verifica-se que, para a mesma latitude, ou seja, para 40° (Aveiro) e utilizando as mesmas fórmulas para os painéis fixo e ajustável duas e quatro vezes ao ano, obtiveram-se resultados inferiores em 0,7 % para o painel fixo, 0,4 % para o painel ajustável duas vezes ao ano e 0,5 % para o painel ajustável quatro vezes ao ano. Ou seja, o rendimento obtido em Aveiro para o painel fixo foi de 70,4 %, de 74,8 % para o painel ajustável duas vezes e de 75,2 % para o ajuste quatro vezes ao ano, resultados estes muito próximo dos observados no estudo ‘*Optimum Tilt of Solar Panels*’ [37].

No mesmo estudo são também apresentados resultados para o painel fixo a diferentes latitudes, verificando-se que para latitudes compreendidas entre os 30° e 40° o resultado mantém-se (71 %), o que difere 0,6 % e 0,5 % dos resultados obtidos para Ponta Delgada e Funchal, respetivamente.

Quando é efetuada a comparação com o painel ajustável, verifica-se um incremento de cerca de 5 % relativamente ao fixo. À medida que a latitude local diminui, verifica-se um aumento do rendimento, comprovando o que é apresentado por Charles R. Laudau [37], como pode ser verificado nos resultados apresentados para o Funchal (latitude de 32°). Para a mesma cidade, o painel ajustável apresenta um rendimento global de 75,0 %, contra os 76 % apresentados. Por fim, foi efetuado o ajuste da inclinação quatro vezes ao ano, nas datas sugeridas, verificando-se igualmente, que latitudes inferiores apresentam, além de uma média anual de radiação incidente, (em MJ m⁻²) um rendimento global superior.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A eficiência de um coletor solar é influenciada sobretudo pela posição do mesmo em relação aos raios solares. Com a realização deste trabalho, elaborou-se um modelo em *Visual Basic* que permitiu estudar a otimização de um coletor solar plano em Aveiro, Ponta Delgada e Funchal, utilizando o modelo desenvolvido por C. R. Landau, '*Optimum Tilt of Solar Panels*'[37]. Portanto, com recurso à metodologia apresentada no Capítulo 5, foram efetuadas comparações para o dia médio de cada mês e generalizadas para um ano comum ($n = 365$ dias julianos). Todos os valores apresentados são referentes apenas à radiação direta que atinge os coletores, não considerando as outras componentes da radiação e fatores ambientais e físicos, entre os quais: a temperatura, o vento, presença ou ausência de nuvens, sombreamento e local de instalação do painel.

Os cálculos efetuados permitem verificar que o ajuste do ângulo do painel para as inclinações de Verão e Inverno, nas datas consideradas, conduz a um aumento do rendimento em cerca de 4,5 %, relativamente ao painel com inclinação fixa todo o ano. O ajuste quatro vezes ao ano permite um incremento de aproximadamente 4,9 % quando comparado com o painel fixo. Este ajuste representa um aumento de 0,4 % quando comparado com o ajuste duas vezes ao ano, indo de encontro aos resultados apresentados no modelo de C. R. Landau [37], que apresenta um acréscimo de 0,5 %. Através dos resultados obtidos, constatou-se que quanto menor a latitude do local, maior será o rendimento global. Para o painel com inclinação fixa anual, a inclinação de $\beta/^{\circ} = 0,76\phi/^{\circ} + 3,1$ é aquela que apresenta um rendimento superior e, para o painel ajustável duas vezes ao ano, é o modelo 1 que permite que se obtenham melhores resultados.

Foi também observado que nos meses em que se efetuam os ajustes (março e setembro), o painel fixo apresenta sempre valores de radiação solar incidente (MJ m^{-2}) superiores, dado que se verifica uma diminuição na radiação incidente nos dias imediatamente antes dos ajustes, ou seja, o ângulo de Inverno apresenta um rendimento inferior em março e o ângulo de Verão em setembro, daí o benefício que advém do ajuste nessas datas. O ajuste quatro vezes ao ano permite um aumento anual da radiação incidente, especialmente nos meses de Inverno, o que se traduz num aumento significativo do rendimento (cerca de 85 %) O painel móvel, sendo o painel de referência, apresenta um

rendimento significativamente superior quando comparado com os painéis fixo e ajustável, isto porque rastreia continuamente o Sol, desde o nascer ao pôr-do-sol.

Para concluir, importa referir que todos os valores de rendimento calculados se referem exclusivamente à radiação solar incidente nos painéis para as diferentes latitudes, uma vez que não é objeto deste estudo avaliar o rendimento dos diferentes tipos de painel (térmico, fotovoltaico, entre outros).

Como sugestão de trabalhos futuros, seria interessante a recolha de dados da radiação solar em Portugal durante um período considerável (entre 10 a 30 anos), de forma a encontrar o ângulo ótimo de inclinação, baseado na média mensal de radiação solar incidente. Deste modo, seria possível desenvolver um modelo alternativo que permita estimar a radiação solar global incidente em superfícies planas, em Portugal continental e ilhas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. P. Chang, “Study on the optimal tilt angle of solar collector according to different radiation types,” *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 151–161, 2008.
- [2] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera.” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>. [Accessed: 28-May-2016].
- [3] GREENPRO, “Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalações,” *ALTENER*, 2004.
- [4] “Solargis.” [Online]. Available: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview/>. [Accessed: 18-Aug-2016].
- [5] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edi. New York: John Wiley & Sons. Inc, 2013.
- [6] M. C. Pereira, *Energias Renováveis, a Opção Inadiável*, 1^a Edição. Lisboa: SPES, Sociedade Portuguesa de Energia Solar, 2000.
- [7] H. Li, Y. Lian, X. Wang, W. Ma, and L. Zhao, “Solar constant values for estimating solar radiation,” *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1785–1789, 2011.
- [8] K. de S. O. Filho and M. de F. O. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica*. Porto Alegre: Departamento de Astronomia - Instituto de Física Iniversidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- [9] G. E. Hassan, M. E. Youssef, Z. E. Mohamed, M. A. Ali, and A. A. Hanafy, “New Temperature-based Models for Predicting Global Solar Radiation,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 437–450, 2016.
- [10] M. Ferreira and G. Almeida, *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, 7^a Edição. 2004.
- [11] “Calculs Astronomiques - Applications.” [Online]. Available: <http://cleyo.free.fr/satellite/reperage.php>. [Accessed: 13-Sep-2016].
- [12] A. P. Miguens, *Navegação: A ciência e a Arte, Navegação Astronómica e Derrotas*, Volume II. .
- [13] M. Iqbal, *AN INTRODUCTION TO SOLAR RADIATION*. Vancouver: Academic Press, 1983.
- [14] P. Würfel, *A Física de células solares*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [15] J. Ramage, *Guia da Energia*, 1^a Edição. Londres: MONITOR - Projectos e

- Edições, Lda, 2003.
- [16] C. Allen, *Astrophysical Quantidades*, 3^a Ed. London, 1976.
- [17] J. Brownson, “Solar Resource Assessment and Economics,” *JOHN A. DUTTON E-EDUCATION INSTITUTE*, 2014. [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/576>.
- [18] R. J. M. Cortez, “Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [19] M. Benghanem, “Optimization of tilt angle for solar panel : Case study for Madinah , Saudi Arabia,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1427–1433, 2011.
- [20] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd Editio. Academic Press, 2014.
- [21] M. Despotovic and V. Nedic, “Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly , seasonal and monthly levels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 97, pp. 121–131, 2015.
- [22] E. Mazria, “The Passive Solar Energy Book,” Rodale Press: Emmaus, PA, USA, 1979.
- [23] F. C. Trevelin, “Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos,” 2014.
- [24] E. D. Mehleri, P. L. Zervas, H. Sarimveis, J. A. Palyvos, and N. C. Markatos, “Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2475, 2010.
- [25] A. M. Muzathik, M. Z. Ibrahim, K. B. Samo, and W. B. Wan Nik, “Estimation of global solar irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 812–818, 2011.
- [26] R. Brasileira, “Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal,” no. December, 2003.
- [27] D. Y. Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, Third Edit. New York: Taylor & Francis Group, 2015.
- [28] B. Jamil, A. T. Siddiqui, and N. Akhtar, “Engineering Science and Technology , an International Journal Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India,” 2016.
- [29] T. R. Ayodele and A. S. O. Ogunjuyigbe, “Prediction of monthly average global

- solar radiation based on statistical distribution of clearness index,” *Energy*, vol. 90, pp. 1733–1742, 2015.
- [30] N. Mohammad and T. Karim, “Design and Implementation of Hybrid Automatic Solar-Tracking System,” *J. Sol. Energy Eng* 135(1), 011013, p. 6, 2012.
- [31] A. Bahrami, C. O. Okoye, and U. Atikol, “The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 896–906, 2016.
- [32] B. Chuco, “Otimização da potência de operação em sistema isolado fotovoltaico usando técnicas de inteligência artificial,” 2007.
- [33] D. H. W. Li and T. N. T. Lam, “Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based on measured solar radiance data,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2007, 2007.
- [34] “KIPP & ZONEN.” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/ProductGroup/1/Solar-Instruments>. [Accessed: 14-Sep-2016].
- [35] “hellopro.fr - Partenaire de vos achats professionnels.” [Online]. Available: <http://www.hellopro.fr/>. [Accessed: 05-Sep-2016].
- [36] E. A. Handoyo, D. Ichsani, and Prabowo, “The optimal tilt angle of a solar collector,” *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 166–175, 2013.
- [37] C. R. Landau, “Optimum Tilt of Solar Panels,” 2012.
- [38] P. J. Axaopoulos and E. D. Fylladitakis, “ENERGY AND ECONOMIC COMPARATIVE STUDY OF A TRACKING VS . A FIXED PHOTOVOLTAIC SYSTEM,” vol. 9, no. 12, pp. 50–69, 2013.
- [39] T. O. Kaddoura, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, “On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 626–634, 2016.
- [40] H. Heywood, “Operating experience with solar water heating,” 1971.
- [41] G. Lof and R. Tybout, “Cost of house heating with solar energy,” *Solar Energy*, pp. 39:63–9, 1973.
- [42] H. Moghadam, F. F. Tabrizi, and A. Z. Sharak, “Optimization of solar flat collector inclination,” *Desalination*, vol. 265, no. 1–3, pp. 107–111, 2011.
- [43] C. L. Cheng, C. S. Sanchez Jimenez, and M. C. Lee, “Research of BIPV optimal

- tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1644–1650, 2009.
- [44] D. S. Camelia Stanciu, C. Stanciu, and D. Stanciu, “Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, no. 0, pp. 133–143, 2014.
- [45] O. Idowu, “Determination of optimum tilt angles for solar collectors in low-latitude tropical region,” *Int. J. ...*, vol. 4, no. 1, p. 29, 2013.
- [46] D. Appleyard, “Solar Trackers: Facing the Sun,” 2009. [Online]. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html>. [Accessed: 22-Jun-2016].
- [47] G. Li, R. Tang, and H. Zhong, “Optical performance of horizontal single-axis tracked solar panels,” *Energy Procedia*, vol. 16, no. PART C, pp. 1744–1752, 2011.
- [48] F. Pereira, *Guia de Manutenção de Instalações Fotovoltaicas*. Porto: PUBLINDUSTRIA, 2012.
- [49] Y. Ma, G. Li, and R. Tang, “Optical performance of vertical axis three azimuth angles tracked solar panels,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, pp. 1784–1791, 2011.
- [50] A. B. Meinel and M. P. Meinel, *Applied solar energy: An introduction*, 2nd Edition. Arizona: Publishing Co., 1977.
- [51] S. Bowden and C. Honsberg, “Solar Power LAB.” [Online]. Available: <http://pv.asu.edu/>. [Accessed: 02-Jun-2016].

ANEXOS

Anexo A - Média mensal da radiação diária incidente, H (em MJ m⁻²) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês, em Aveiro.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^{\circ} = 30$	$\beta/^{\circ} = 33,5$	$\beta/^{\circ} = 40$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	15,8	16,5	17,5	18,4	18,5	19,3
Fevereiro	19,8	20,3	21,1	22,0	22,0	22,3
Março	23,7	24,0	24,3	23,8	23,9	24,4
Abril	26,4	26,3	25,6	26,6	26,5	26,6
Maio	27,4	26,8	25,5	29,1	27,9	28,9
Junho	27,6	27,0	25,7	29,7	28,6	30,0
Julho	27,5	26,9	25,6	29,6	28,4	29,5
Agosto	27,0	26,8	25,4	27,4	27,4	27,6
Setembro	25,2	25,3	25,2	24,1	23,8	25,5
Outubro	21,6	22,0	22,6	23,0	22,9	22,6
Novembro	17,3	18,1	18,9	20,2	20,3	20,6
Dezembro	15,0	15,6	16,5	18,0	18,1	18,4

Anexo B - Rendimento, η (em %) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês em Aveiro.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^{\circ} = 30$	$\beta/^{\circ} = 33,5$	$\beta/^{\circ} = 40$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	69,9	72,7	74,5	84,5	81,6	85,2
Fevereiro	71,7	73,7	75,5	79,7	79,7	81,0
Março	71,7	72,6	73,4	72,1	72,4	73,7
Abril	69,7	69,3	69,2	69,4	69,6	70,6
Maio	67,2	66,1	62,9	70,0	66,7	68,5
Junho	65,7	65,1	61,2	70,6	65,8	68,5
Julho	66,6	65,3	62,3	70,5	66,3	68,5
Agosto	68,6	68,4	64,9	69,4	68,3	68,7
Setembro	70,8	71,1	71,1	67,9	67,1	71,7
Outubro	72,0	73,6	75,7	76,9	76,5	75,4
Novembro	70,7	74,0	75,5	82,5	82,9	84,4
Dezembro	70,2	72,7	75,1	84,2	84,6	85,7

Anexo C - Média mensal da radiação diária incidente, H (em MJ m⁻²) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês, em Ponta Delgada.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^\circ = 28$	$\beta/^\circ = 31,98$	$\beta/^\circ = 38$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	16,4	17,3	17,9	19,7	19,7	20,0
Fevereiro	20,2	20,8	21,4	22,5	22,8	22,9
Março	23,9	24,3	24,5	24,0	24,0	24,7
Abril	26,5	26,5	25,5	26,7	26,4	26,8
Maio	27,5	26,9	25,6	29,1	28,1	29,0
Junho	27,8	27,0	25,7	29,8	28,5	30,1
Julho	27,7	26,9	25,5	29,7	28,2	29,7
Agosto	27,1	26,8	25,6	27,5	27,3	27,7
Setembro	25,4	25,5	25,4	24,3	23,8	25,5
Outubro	21,9	22,4	23,0	23,4	23,5	23,3
Novembro	17,9	18,5	19,4	20,3	20,3	21,0
Dezembro	15,4	16,2	17,2	18,9	19,0	19,2

Anexo D - Rendimento, η (em %) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês em Ponta Delgada.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^\circ = 28$	$\beta/^\circ = 31,98$	$\beta/^\circ = 38$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	69,2	72,9	75,5	83,1	83,2	84,1
Fevereiro	71,3	73,5	75,6	79,3	80,5	80,9
Março	71,6	72,5	73,3	71,6	71,7	73,8
Abril	69,8	69,7	67,1	70,2	69,2	70,8
Maio	67,4	67,4	62,8	71,4	68,2	70,4
Junho	66,3	65,2	61,3	71,1	67,3	69,1
Julho	67,0	65,5	61,7	71,7	67,0	69,2
Agosto	68,8	68,1	64,8	70,6	68,8	69,0
Setembro	70,9	71,1	70,9	68,5	66,6	71,1
Outubro	71,7	73,4	75,3	76,6	76,9	76,3
Novembro	70,7	73,0	76,7	79,6	80,0	82,6
Dezembro	68,5	71,9	76,4	83,7	84,1	85,1

Anexo E - Média mensal da radiação diária incidente, H (em MJ m⁻²) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês, no Funchal.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^\circ = 22$	$\beta/^\circ = 27,42$	$\beta/^\circ = 32$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	18,0	19,0	19,8	21,8	21,6	21,9
Fevereiro	21,4	22,3	22,7	23,9	23,7	23,9
Março	24,7	25,1	25,2	24,6	24,6	25,6
Abril	27,0	26,6	25,9	27,0	26,9	27,1
Maio	27,6	26,9	25,5	29,4	28,2	29,7
Junho	27,9	26,9	26,1	29,9	28,5	30,5
Julho	27,8	26,8	25,4	29,9	28,4	30,1
Agosto	27,3	26,9	26,1	27,8	27,7	28,1
Setembro	25,9	25,9	25,8	24,4	24,8	26,5
Outubro	23,0	23,7	23,9	24,7	24,3	24,4
Novembro	19,4	20,4	20,9	22,5	22,4	22,6
Dezembro	17,3	18,6	19,0	20,9	20,9	21,6

Anexo F - Rendimento, η (em %) das diferentes inclinações dos painéis, para o dia médio do mês no Funchal.

Mês	Fixo			Ajustável 2×/ano		Ajustável 4×/ano
	$\beta/^\circ = 22$	$\beta/^\circ = 27,42$	$\beta/^\circ = 32$	Modelo 1	Modelo 2	
Janeiro	67,8	71,7	74,8	82,2	81,4	82,5
Fevereiro	70,7	73,6	75,0	79,0	78,1	78,7
Março	71,5	72,7	72,9	71,3	71,3	74,1
Abril	70,4	69,9	67,6	70,8	70,0	71,1
Maio	67,8	67,2	62,2	73,1	68,8	71,6
Junho	67,0	65,8	61,3	73,0	67,9	71,2
Julho	67,6	66,0	61,9	73,4	68,2	71,1
Agosto	69,2	68,3	66,0	70,7	69,7	70,2
Setembro	71,1	71,1	70,9	66,9	68,1	72,7
Outubro	71,5	73,7	74,4	76,8	75,6	75,9
Novembro	69,6	73,0	75,0	80,7	80,5	81,1
Dezembro	67,8	72,7	74,5	82,1	82,0	84,5